

1 放眼星空

1

星空是眼睛的食粮。

——爱默生 (R. W. Emerson, 1803~1882, 美国
散文家和诗人)

就我而言，除了观赏星辰使我梦想之外，我肯定
什么也不知道。

——凡·高 (Vincent Van Gogh, 1853~1890, 荷
兰画家)

观测星辰是一种实践，跟人类思维一样古老，从而形成一门最古老科学——天文学的基础。历代天文学家把星空用于各种目的：崇拜、指导生产与生活，但最终将其作为更多地认识宇宙的场所，并且延续到现代的星空观测者们。和我们的祖先一样，我们被宇宙所展现出来的迷人奇观吸引，迸发出去追寻和探究的激情。然而，它以似乎难以逾越的、超乎我们想象的距离向我们挑战。我们坐在这儿，身处宇宙，其间充满大量可见而不可及，更不能加以品味的惊奇事物。幸好，我们拥有天生的求知意识和良好的推理能力，能够推断出我们的感官无法直接把握的宇宙事物。

就我们所见的一切，从原子的微观世界到星系的宇观领域，到处都体现着宇宙的复杂性。我们为何能够鉴赏如此令人惊诧的时间和空间范围？初看起来，对于我们没有希望得到第一手经验的事物，我们似乎不可能测量和了解它们。我们必须从某处着手。于是，人们以各种可能的客观方法对宇宙的天体加以测量和分类，将星空的光点和辉斑区分为行星、卫星、彗星、小行星、恒星、星云、星系和超星系团。

棘手问题在于分隔我们与这些天体的是空间深渊。显然它们不是我们在地球上习以为常的会友距离，但无论如何我们可以尝试了解它们。首先，我们从



图 1.1 飞往木星的“伽利略号”飞船在 1992 年拍摄的地球和月球。从那么远的距离看，我们那多水的蔚蓝色地球世界像是在安详地迎宾

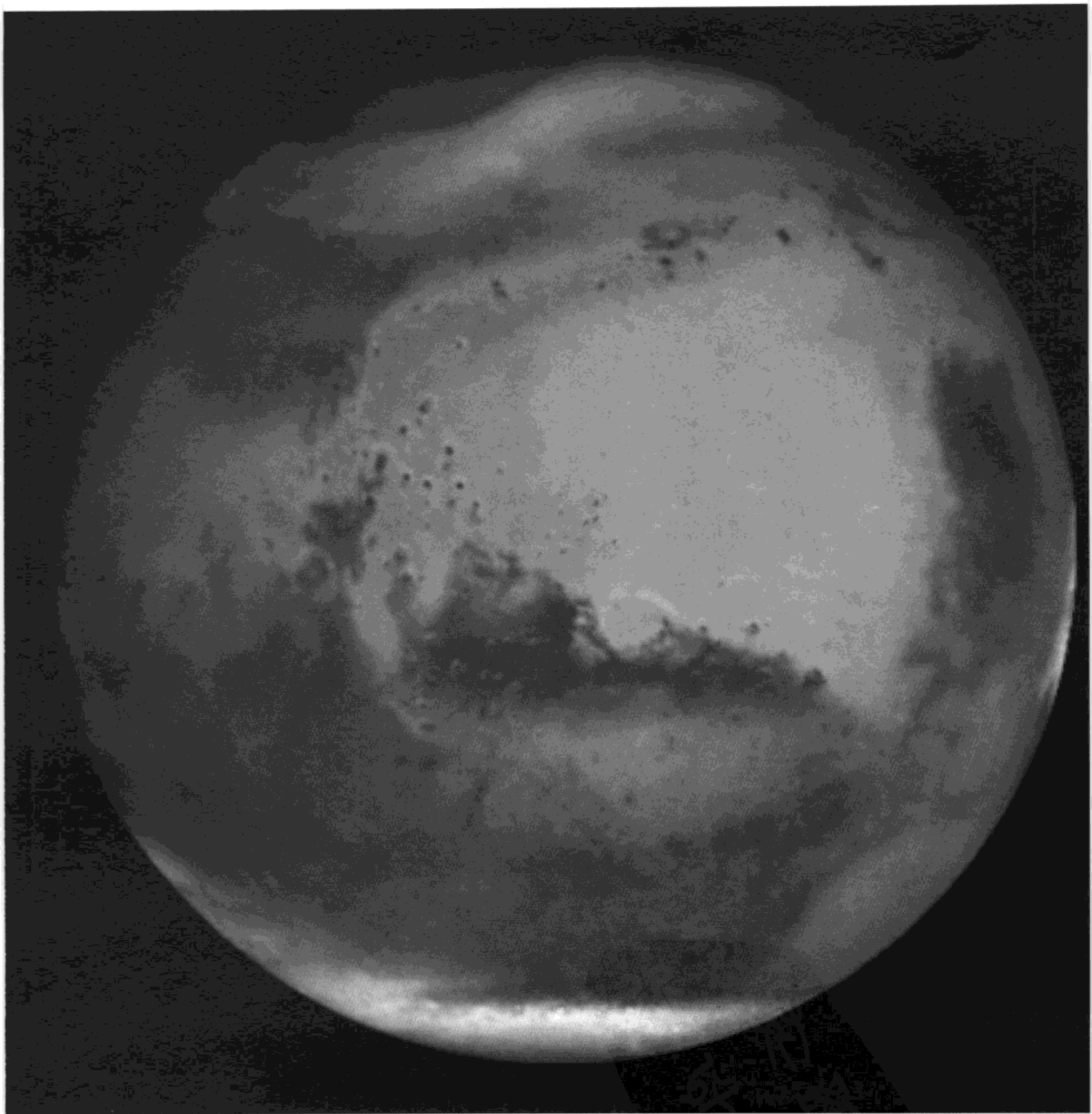


图 1.2 火星仍令星空观测者们着迷。现今我们使用从爱好者望远镜到哈勃空间望远镜的各种仪器观测它。轻便的火星车探测器继续测绘火星的表面、研究它的地形。人类探测火星的长久梦想已开始实现，但到火星表面旅游需尚待时日

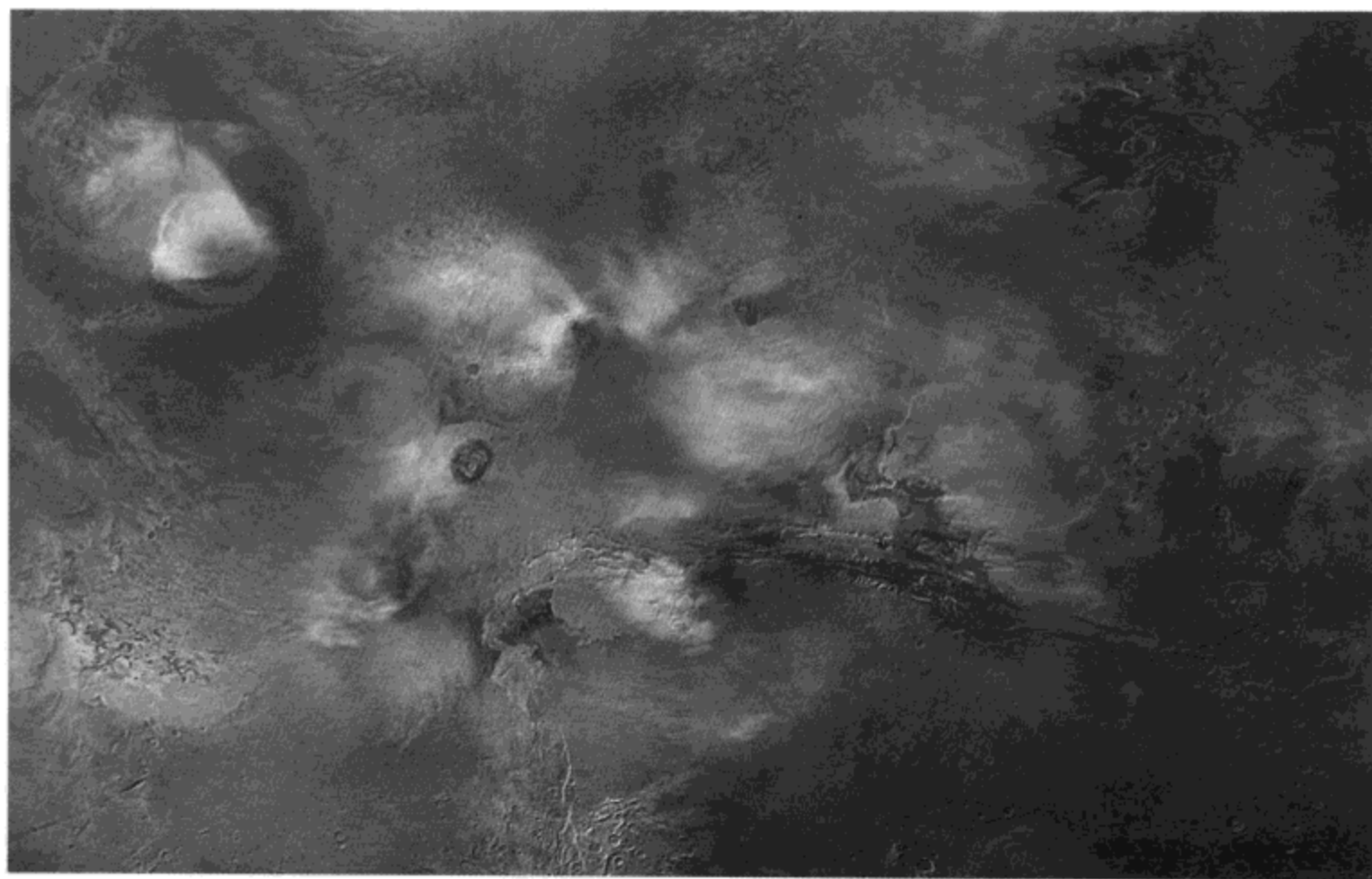


图 1.3 山脉和谷系是火星的主要景观。在“火星全球勘测者号”轨道探测器飞越火星表面所拍摄的这幅照片上，太阳系最大火山之一——奥林匹斯火山位于左上角，其上空有云气缭绕。图右下方有跨越几千千米的大谷系，如果在地球上，这样的大谷系可跨越北美大陆

上学或上班开始，建立我们熟知的距离“阶梯”。当然，出国旅游就走得更远。从地球表面“跳跃”到月球，对任何时代的人都是一大步，太阳系的外边界甚至更远。从我们的行星——地球上的小小居住地到银河系的诸恒星，我们放眼遥望。在银河系之外，我们观测宇宙中运转的成团星系。恰在我们天文视野的最远边界——那里的光旅行数十亿年才到达我们这里，我们发现了宇宙诞生的微弱余晖。

若用我们熟悉的千米表示，这样的距离就是亿万级巨大的“天文数字”。为了避免使用巨大数字带来的不便，我们把数万亿千米定义为表述大距离的新单位。在天文学上，常用的距离单位是“光年”、“秒差距”和“百万秒差距”。这样的单位术语难以理解，但在天文学上使用这些术语却更方便，每个新发现让我们学到更多东西。对于几十亿光年远的一个星系，我们马上可以评述其旋涡结构，如同它就在另一个国家一样方便。

为了理解天文距离，我们需要从地球开始。我们从自己的屋子往外看，可以看到太阳、月球和行星，就很想知道它们有多么远。天体力学、简单的观测、在某些情况下使用雷达信号都可以帮助我们确定太阳系内天体的距离。例如，地球到太阳的距离是 1.49 亿千米，定义为 1 天文单位（距离）。以每秒 30 万千米传

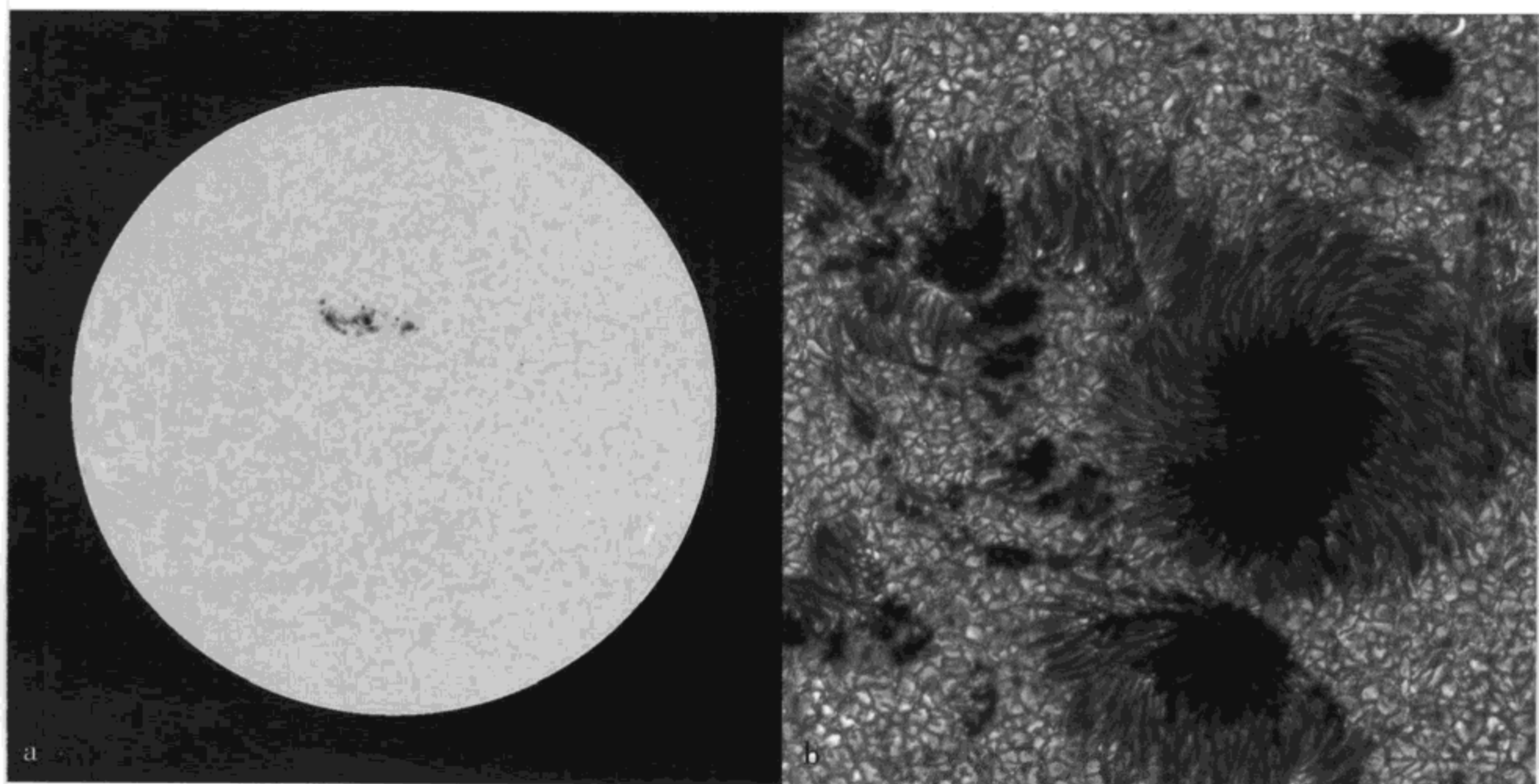
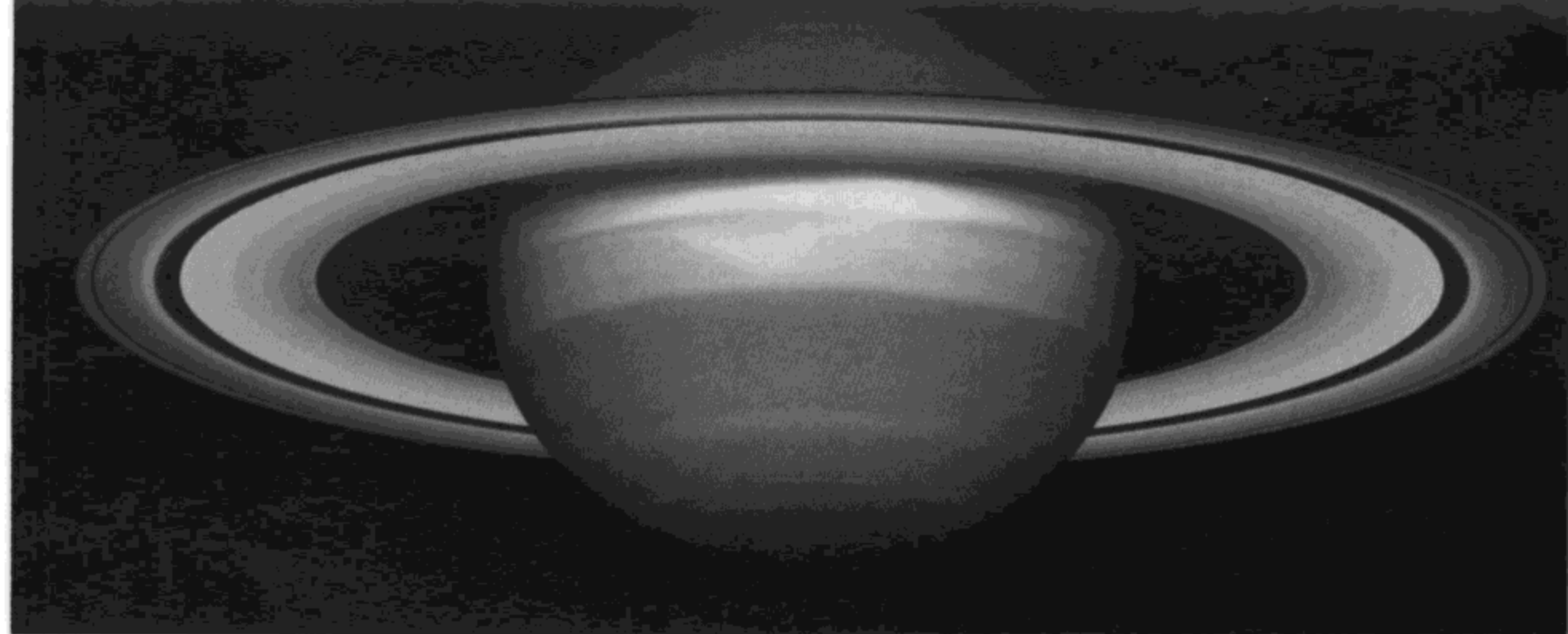


图 1.4 （上方）土星最令人瞩目的特征是它的复杂而美丽的环系，它在土星赤道上空延展几十万千米。在土星的富氢大气中反复出现风暴，暗示云顶下面的动力学变化

图 1.5 （下方）太阳是太阳系内的光和热的主要源泉，同时也给天文学家提供了一个最近的恒星示例。图 a：太阳视面常出现称之为“黑子”的一些冷而暗的区域，它们随太阳的自转而呈现为横过视面的运动。图 b：2002 年 7 月 15 日的太阳表面局部高分辨像，我们可以看到遍布的“米粒”和黑子的结构——最暗的“本影”及其周围较暗的“半影”纤维。我们对太阳黑子出现和消失的循环了解得越多，就越有助于我们探测其他恒星的类似黑子活动

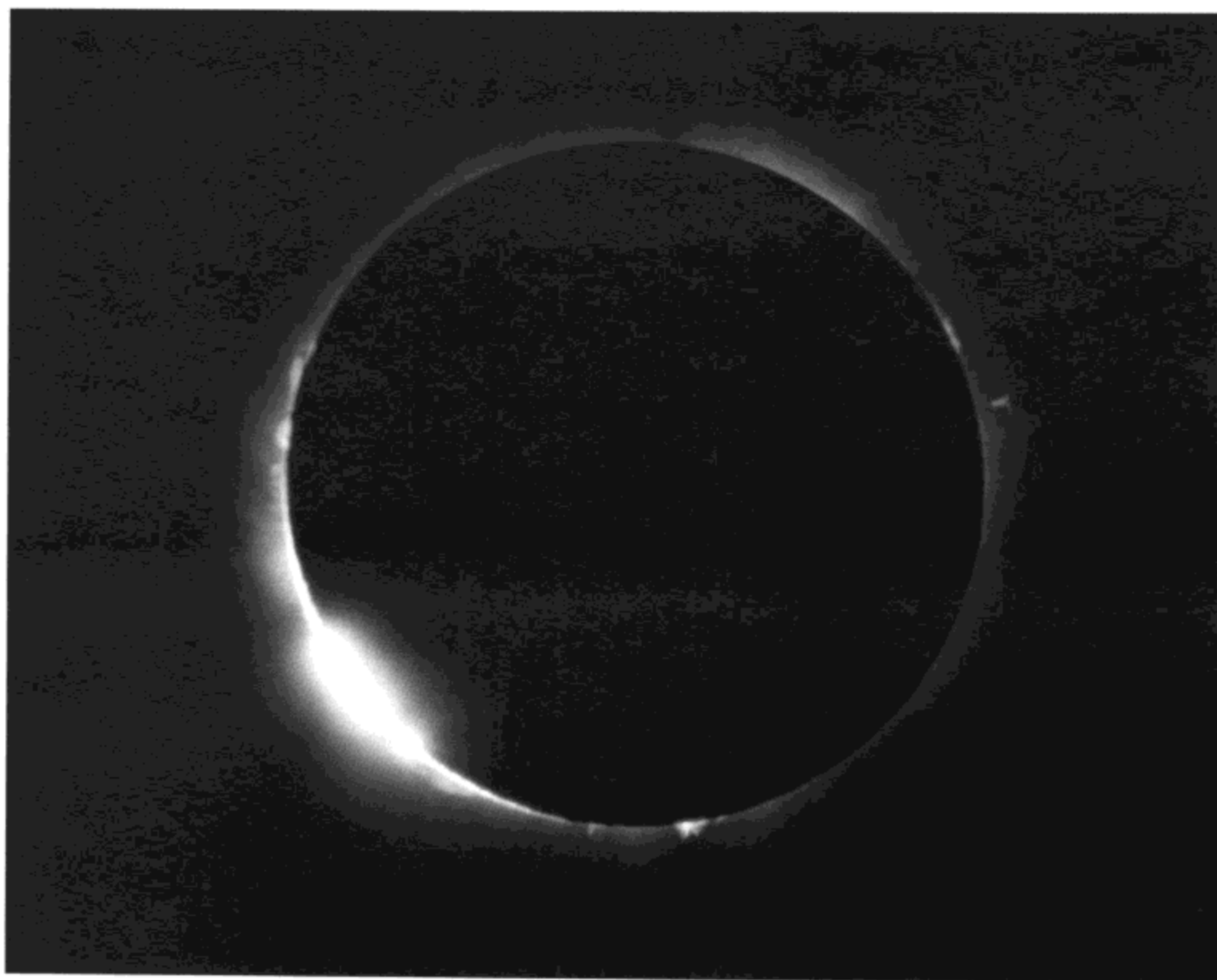


图 1.6 古代人恐惧日全食，而当今的观测者却不惜长途跋涉去目睹日全食的奇观。日全食不易见到，这是我们在一次日全食中“捕捉”到的太阳的超热外部大气——日冕的奇观。太阳风来自日冕，流过行星，远逃到恒星际空间

播的光线需要 8 分钟传播这样远的距离，我们就说太阳离我们 8 光分（钟）远。月球离地球 38 万千米，光线传播需 1.27 秒钟，于是可以说月球离我们 1.27 光秒（钟）远。火星离太阳约 2.28 亿千米，或 13 光分（钟）远。遥远的外行星——冥王星距太阳 59 亿千米，或 5.5 光（小）时远。

这些距离是较容易掌握的，但是，当我们开始观测一些附近的恒星和星系时，距离就成为巨大的天文数字，因为类似“41000 亿千米”这样的一些数字已

图 1.7（下页）恒星的诞生是其一生中最重大的谜题之一。距地球约 1500 光年的猎户星云是银河系中最邻近地球的恒星“摇篮”，它是跟巨大的猎户座分子云成协的热气体泡。由于猎户座恒星诞生区周围的气体-尘埃云的遮挡，我们很难观测到恒星的形成活动。但是，人眼看不到的红外线（波长大于可见光）辐射可以穿透这些气体-尘埃云，从而为天文学家观测恒星摇篮提供了一扇窗口。在“2 微米全天空巡天计划”（2MASS，从 1997 年开始，天文学家在美国亚利桑那州和南美的智利架设了 2 台高度自动化的 1.3 米口径的望远镜，在地面进行近红外巡天观测）中，人们拍摄到了这些红外像，并将数据转化成伪彩像，以模拟具有红外敏感“千里眼”的人们所看到的景象。图中，蓝色和红色表示猎户星云中各种气体发射的光

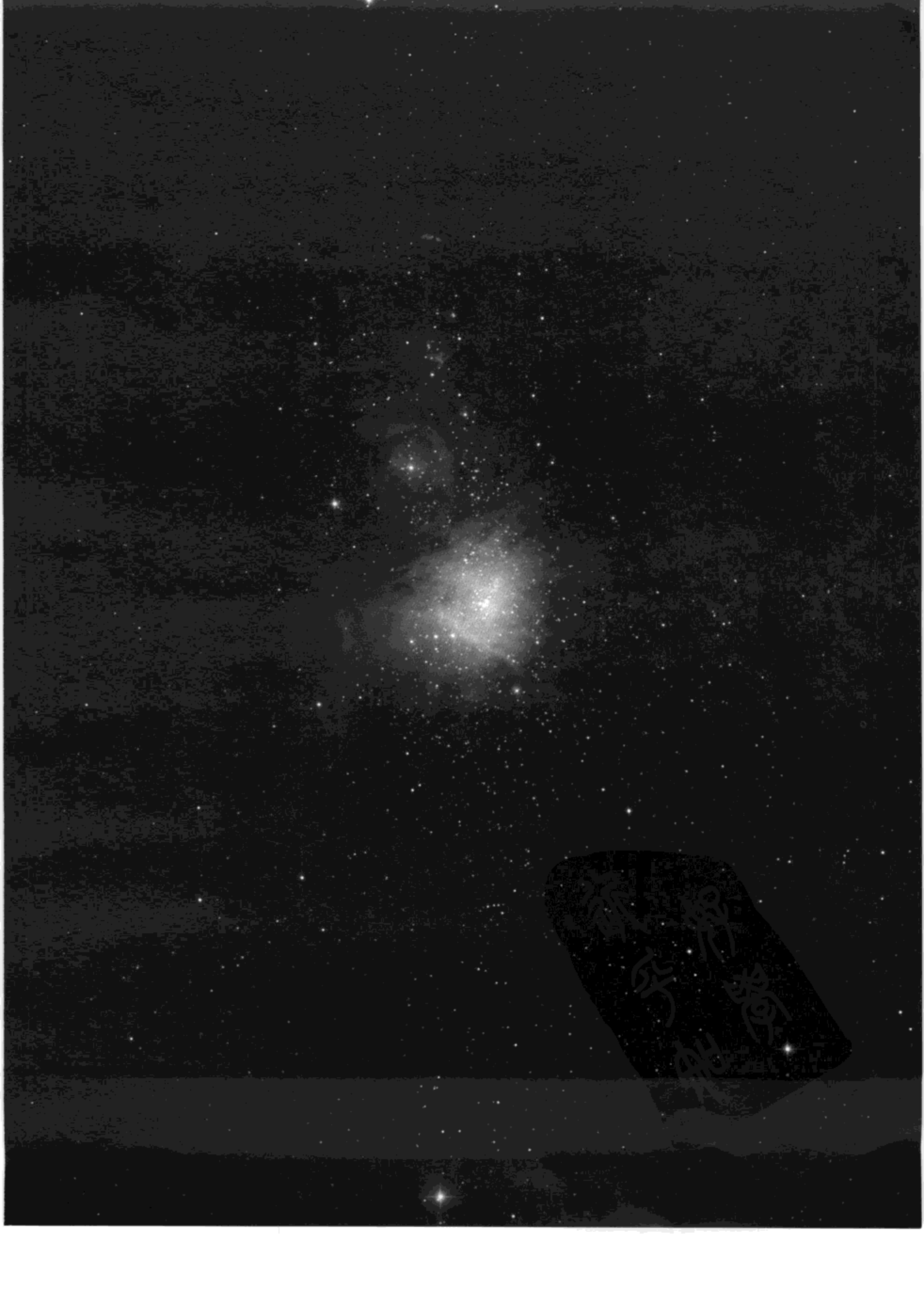
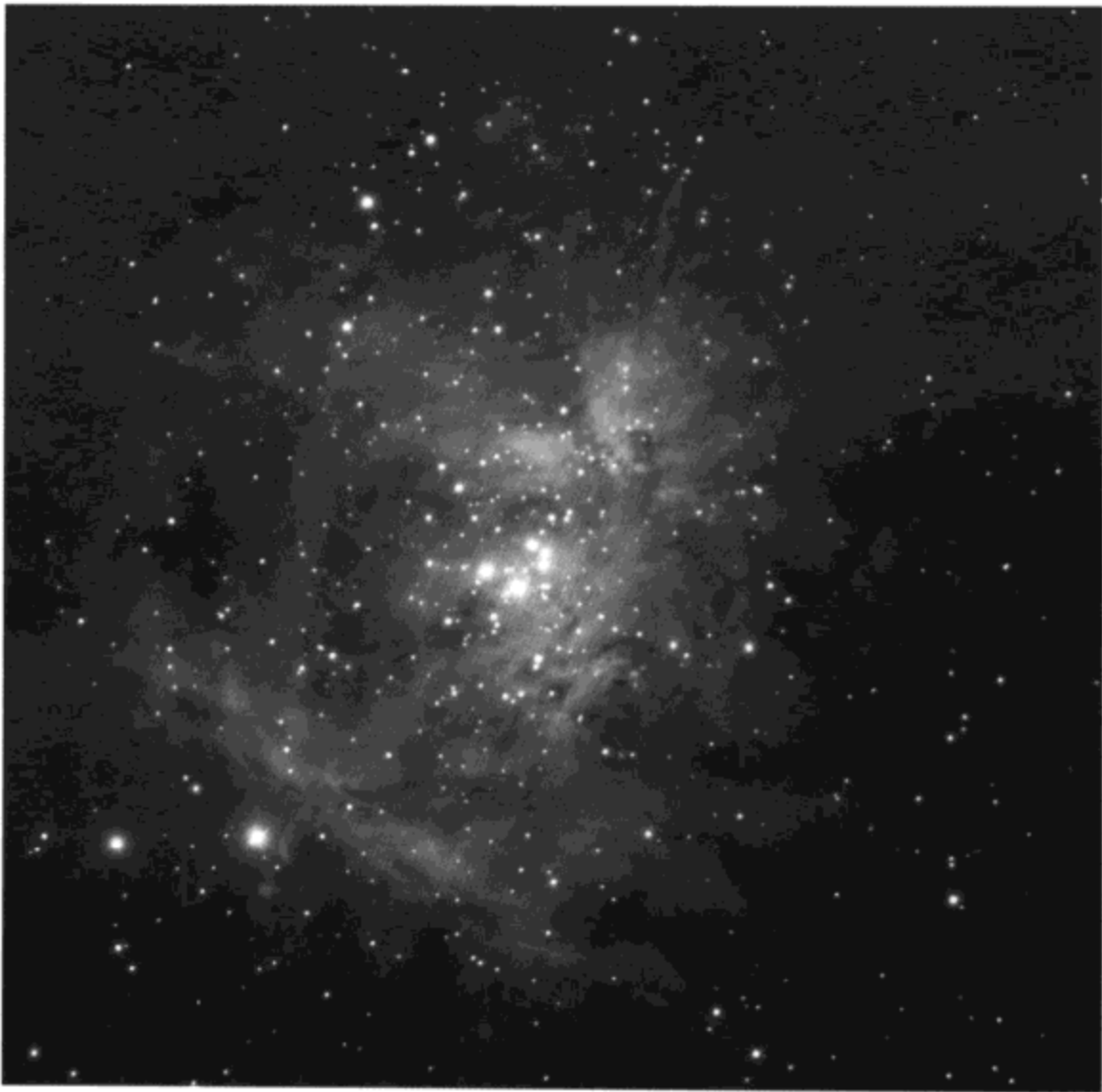


图 1.8 红外光拍摄到的猎户星云“心脏”区域。设在智利的欧洲南方天文台重点观测位于猎户星云心脏部位的四边形星团。这个恒星形成区是数百颗热而亮的年轻恒星的家园，在可见光波段容易看到它们。天文学家们在搜寻褐矮星，它们是一种亚恒星，比正常恒星小且冷，但又比行星热，它们在红外波段却很醒目



经相当拗口。因此，天文学家又提出一些较易理解的距离单位。首先是“秒差距”，它等于 206265 天文单位或更易记的 3.26 光年。用这种天文单位，我们到最近的恒星——半人马座比邻星的距离是 1.3 秒差距，到银河系的一个伴星系——大麦哲伦云的距离是 52000 秒差距或 52 千秒差距。对于更远的距离，我们使用兆秒差距，即百万秒差距。不管怎样去量度它们，我们都不得不用巨大数字来表述这些难以置信的距离（表 1.1）。

8 表 1.1 距离的对比

距离单位	千 米	光传播的时间
光秒	3×10^5	1 秒钟
光分	1.8×10^7	1 分钟
天文单位 (AU)	1.5×10^8	8 分钟
光年	9.5×10^{12}	1 年
秒差距 (pc)	3.1×10^{13}	3.26 年
千秒差距 (kpc)	3.1×10^{16}	3.26 千年
兆秒差距 (Mpc)	3.1×10^{19}	3.26 兆年

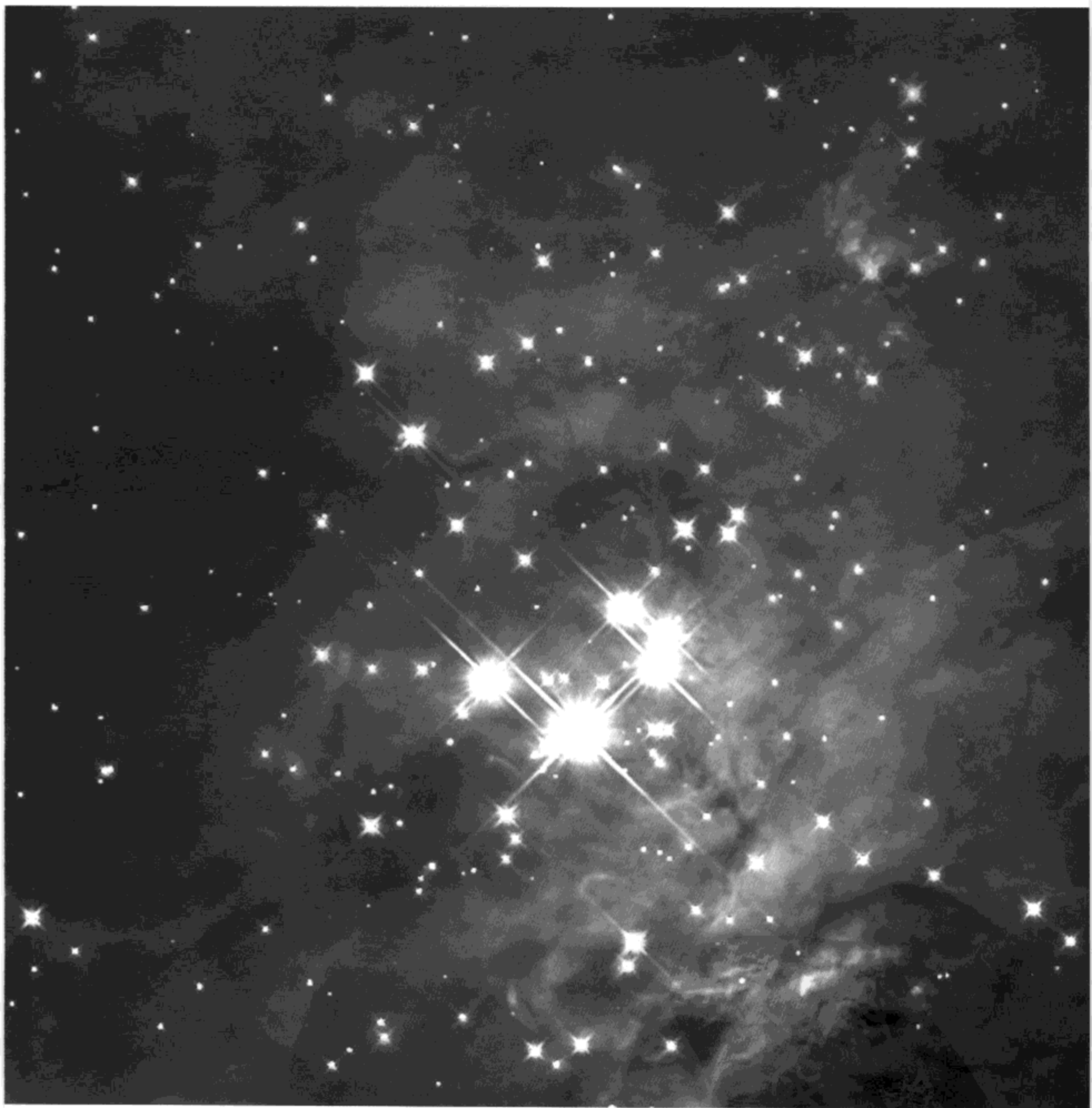


图 1.9 哈勃空间望远镜参与搜寻猎户星云四边形星团区的褐矮星。在这个隐藏着 300 多颗新生恒星的生气勃勃的“摇篮”里，特殊的红外照相机拍摄到了 50 颗褐矮星（图片中最暗淡的星体）



图 1.10 诞生恒星的温床散布在整个银河系。鹰状星云 (M16) 中的著名“造星柱”显示了多波段方法探寻恒星诞生的价值。图 a 是哈勃空间望远镜拍摄的 M16 “造星柱”伪彩像, 附近一颗恒星的紫外辐射在“蚕食”掉恒星际的气体-尘埃云。设在智利的欧洲南方天文台的甚大望远镜上配有红外光谱仪和阵列照相机 (ISAAC), 可以拍摄到星际云背后的天体, 揭示了一些恒星形成“巢穴”和位于两个“造星柱”尖上的几颗很年轻的较大质量恒星 (图 b)

图 1.11 在混杂星际尘埃的氢气体区 (天文学家称之为冷分子云), 含有恒星的“种子”。哈勃空间望远镜“盯住”了半人马星座这些浑名为“撒克里球状体” (Thackeray's Globules) 的天体。它们飘浮在空间, 有更透明的气体云衬托, 而气体云被附近大于太阳质量的年轻恒星的辐射照亮

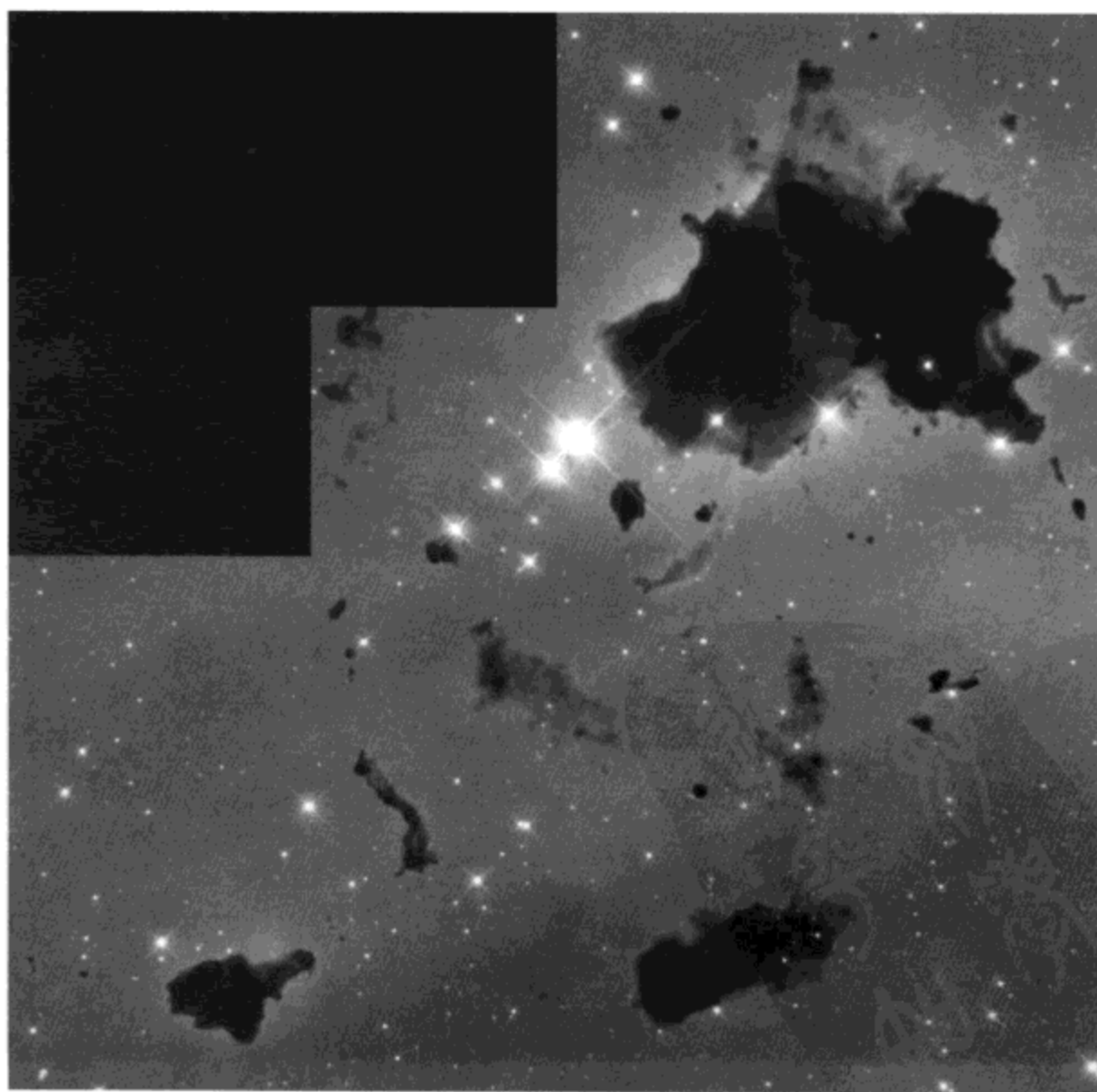
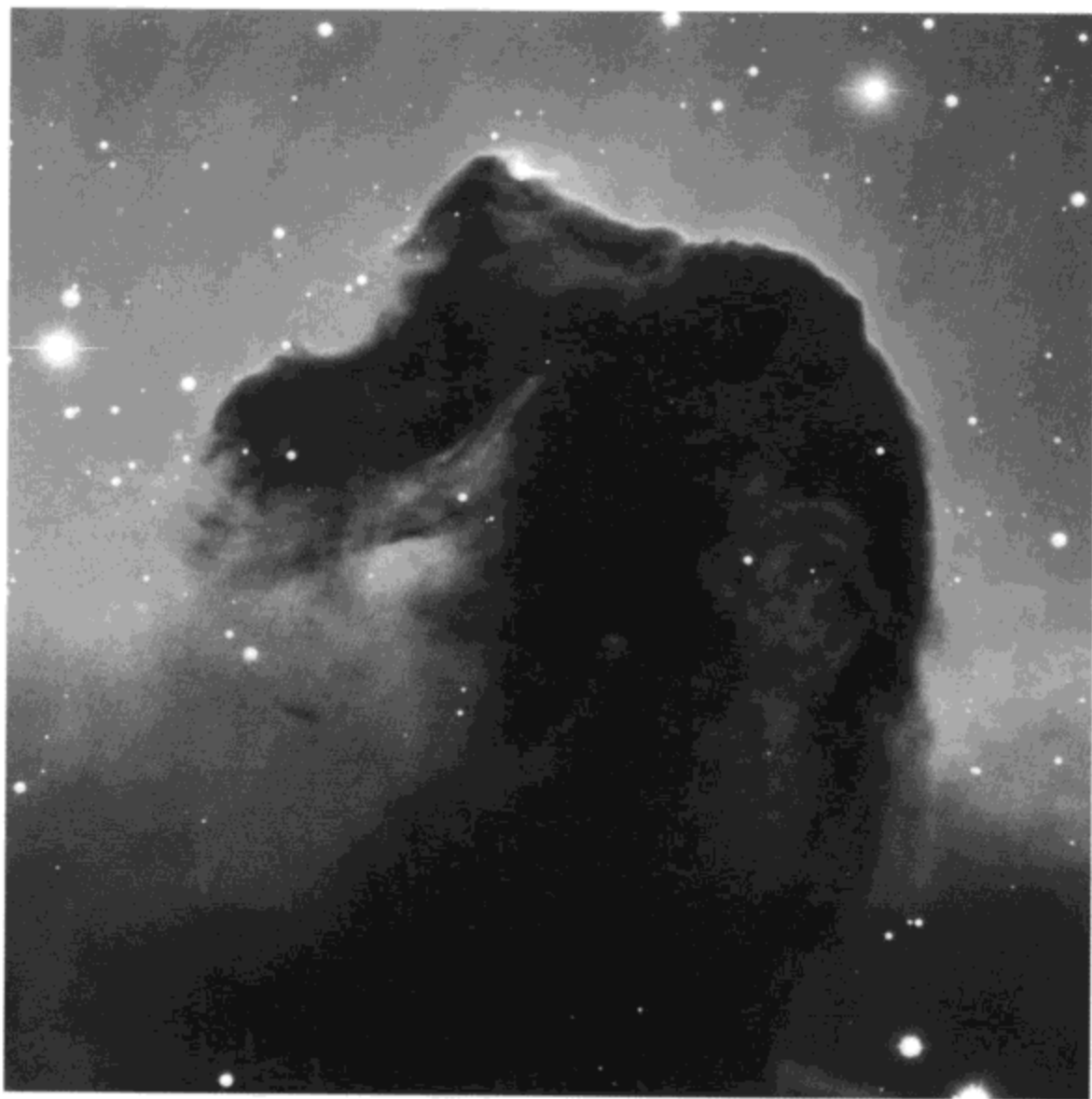


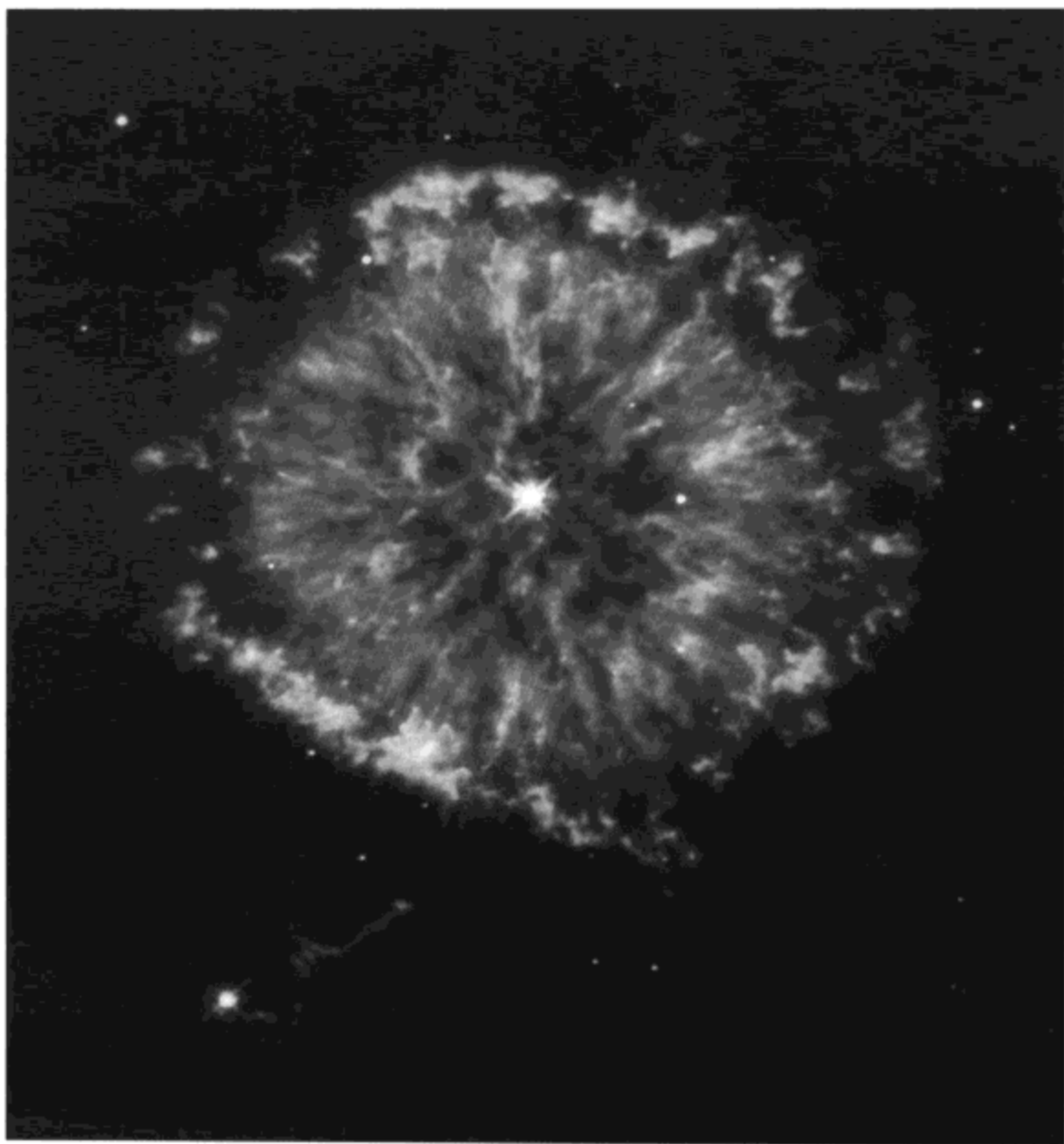
图 1.12 著名的马头星云是一个冷分子云，它延伸到另一个热的氢气体（发光）区。在马头顶端，明亮的边缘把它与周围的氢气体区分开。亮边缘是电离区前沿，从附近恒星来的热光子在那里破解尘埃并加热气体。而且，受热的气体发射出光——成为亮的发射星云



当然，在我们探索宇宙的过程中，距离并不是我们要克服的唯一困难。从看到一个遥远天体的图像到真正认识它是什么以及如何形成之间，存在着一个认识差距。美国亚利桑那州陨击坑图片告诉我们关于地球过去的一个陨击事件。在像 11 火星的表面上，我们发现水流过的证据，跟现在的荒漠地貌有着天壤之别。木星的云在我们眼前翻滚和扭动。在太阳系之外，我们看到很多气体-尘埃云，现在我们知道那里是恒星的诞生地；然而，100 年前的天文学家还不知道它们由什么组成。在别处，一个看似不祥的星云是一颗超巨星在猛烈激变中死亡的残留物。一个翘曲星系的图片唤起了我们的求知欲望：它是怎样形成的？经历了怎样的演化过程？当我们观测越遥远的空间，我们看到的天体就越古老，因为它们的光线要经过很长时间才传播到我们这里，所以我们看到的不是它们现在的情况，而是它们年轻时的容貌。当我们观测天体并对其进行分类时，我们提出大量疑问：它们是些什么天体？是怎样形成的？又将怎样衰亡？它们在宇宙演化中处于什么样的地位？

天文学家热衷于解答这些问题和诸多其他问题。如果天文学家可以不受任何物理学定律的束缚，能够自由地驾乘太空点火船以超过光速的速度穿过银河系，

图 1.13 了解恒星怎样死亡如同了解它们的诞生环境一样重要。天文学家最常面对的一个问题是：“太阳会怎样演变？”当太阳接近其寿命终点时，会抛出其大气，坍缩为缓慢冷却的白矮星。坍缩着的太阳发出的光照亮它早先在死亡“阵痛”中抛出的气壳。图中的行星状星云 NGC 6751 显示了太阳在其行星状星云阶段会是怎样的状况



以高度先进的大范围扫描仪和先进探测器考察星际之谜，那将多么令人激动！不幸的是，我们的寿命太短，也没有超光速飞船，不可能在任何短时期内就经历恒星和星系的整个演化过程。即使我们有超光速飞船，甚至寿命也延长几倍，我们

12 也只能见到一颗恒星或一个星系（我们认为它将更长久地存在）变化着的一生中之短暂的片刻，而不能看到它们的整个演变过程。但我们没有失去所有的希望，因为宇宙留给我们一个勉强算得上的一生线索。我们观测宇宙各处，发现了很多处于不同演化年龄的行星、恒星、星系。这样，即使没有飞船带我们去拜访这些天体，我们也可以研制远程遥测敏感接受器和太空探测器，从地球的视点来研究宇宙。这些手段给我们的答案理所当然地取决于实际探测到的更多的光。

天文学和光线

可以把光线想象为天文学的罗塞达碑（译注：罗塞达碑是公元前 2 世纪初埃及祭司为国王树立的颂德碑，碑文分别用古埃及象形文、俗题文和希腊文刻写，



图 1.14 最特殊类型的恒星死亡发生在一颗大质量恒星以超新星方式爆炸时。在这幅哈勃空间望远镜拍摄的像上，看到的纤维结构是大麦哲伦云（星系）内的一颗大质量恒星在 16 万年前爆炸的遗迹。这个看似平静的结构隐藏着一颗快速自转的中子星——原来的超巨星的可能残骸

因此该碑是破译古埃及象形文字的最重要的线索，而象形文的译解又奠定了研究古埃及历史文化的“埃及学”基础)。就像这块古代石碑包含了解古埃及象形文字著作的线索那样，一束光线能引导我们去了解复杂的宇宙。天体发射和反射着光线，光线含有的天体信息是极其丰富的。你想知道恒星的温度和化学成分吗？¹⁶ 想知道恒星穿越空间的旅行速度和方向吗？想知道它的自转速度和磁场强度吗？想知道两颗星在相互绕转的轨道上怎样共舞吗？想知道某些恒星也有其行星系统

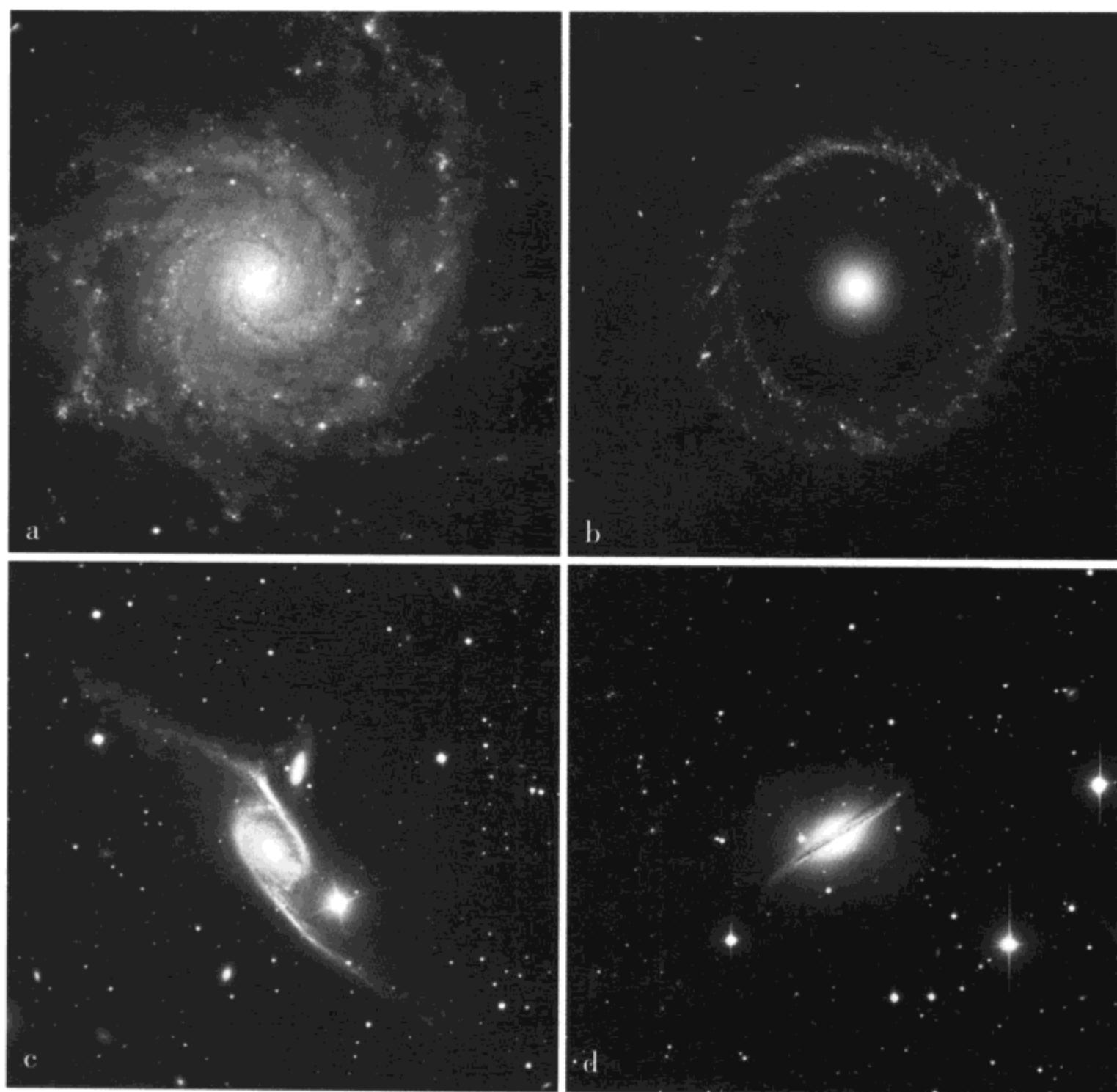


图 1.15 最大的“恒星城市”称为星系。这些星系各含有数千亿颗恒星。各种奇特形态的星系充满宇宙。图 a: 涡轮形的 M74 星系是典型的开旋涡星系，它离我们约 3500 万光年远。图 b: 像郝格天体 (Hoag's Object) 的环状星系自恃有恒星诞生的环区包围一些老年恒星的核心，这种星系可能是由于两个星系一次近相遇而形成的。图 c: NGC 6872 星系的左上旋臂有成束的蓝星形成区，这是该星系最近跟另一星系 (或许是临近的 IC 4970) 相互作用的肯定标志。图 d: 这个淡绿色的、似巴拿马帽形的星系——称为 ESO 510-13——有一个翘曲的赤道尘带，它似乎是一个新近的附加物，它的奇特形貌也可以用久远过去的一次星系的合并来解释

吗？为了找到这些问题的答案，最简便的方法就是研究它们辐射出来的各种波长的光线。

从某种意义上说，天文学的历史可以表征为一部人类破译星光密码的历史。一旦认识到光线是揭示宇宙奥秘的钥匙，我们就研制出巨大阵列的仪器设备，去捕获光线和分析它们的一切表现形式。然而，光线是怎样对如此大量的信息进行

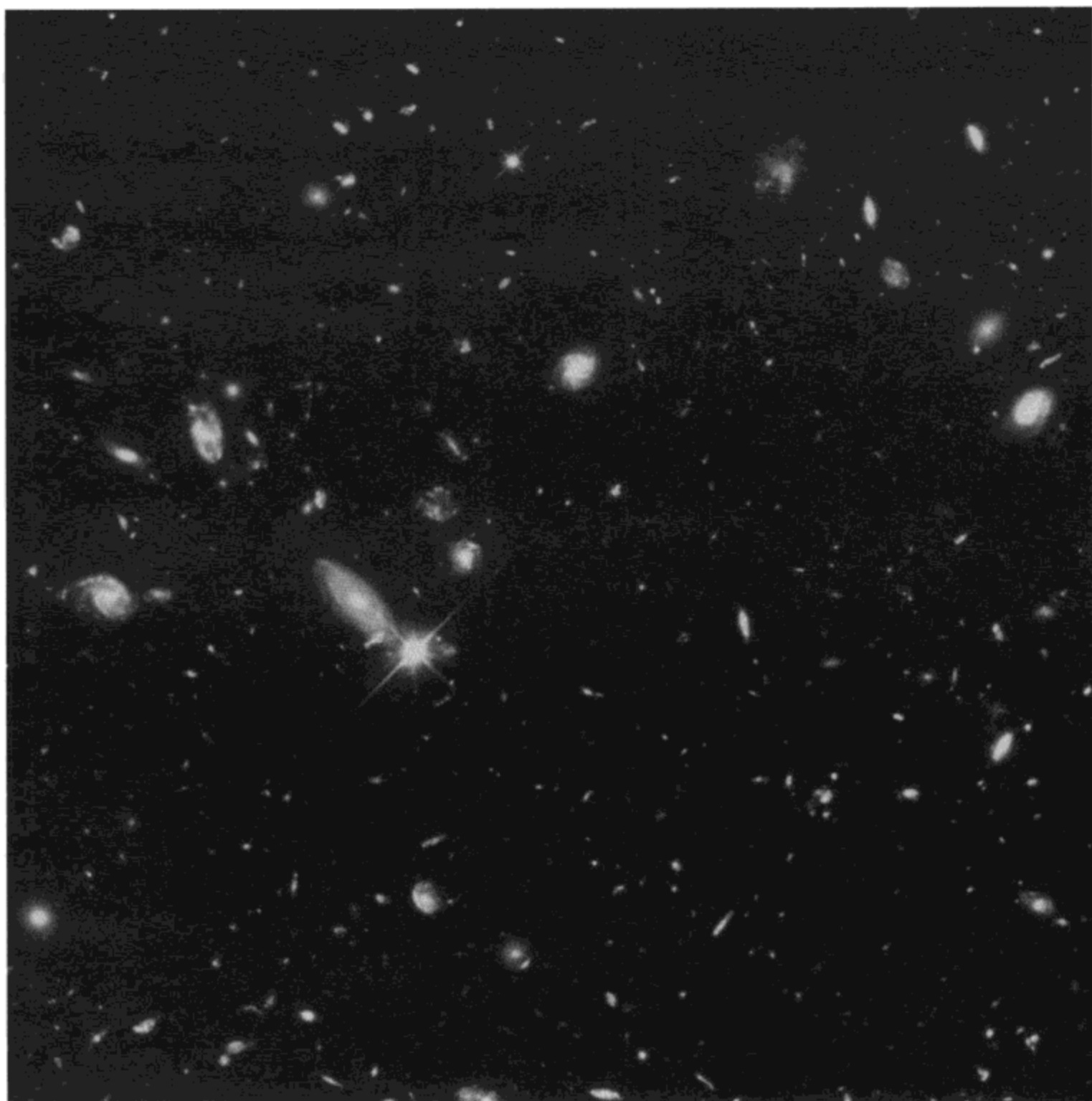


图 1.16 我们把一架望远镜指向星空每个方向，都能够看见一幕充满星系——延续到探测器可测的最远星系的宇宙背景。这是（用长时间观测并拍摄它的哈勃空间望远镜而命名的）“哈勃深空视场”，它包含几百万个几乎各种形态和大小的星系。

编码的呢？

光线是可贵的原材料，关键在于你用什么方法、在什么时候研究它。光线既具有波的特性，又具有称为光子的粒子特性〔译注：“光”应广义地理解为“电磁辐射”或“电磁波”，更通俗地说，光是“以波的形式传播的交变电磁场”。从光（辐射）的波-光（粒）子二象性来说，电磁辐射可按波长从短到长，或相应地频率从高到低，或光子能量从大到小划分为几部分： γ 射线波—— γ 光子、X射线波（X光波）——X光子、紫外线波——紫外光子、可见光波——可见光光

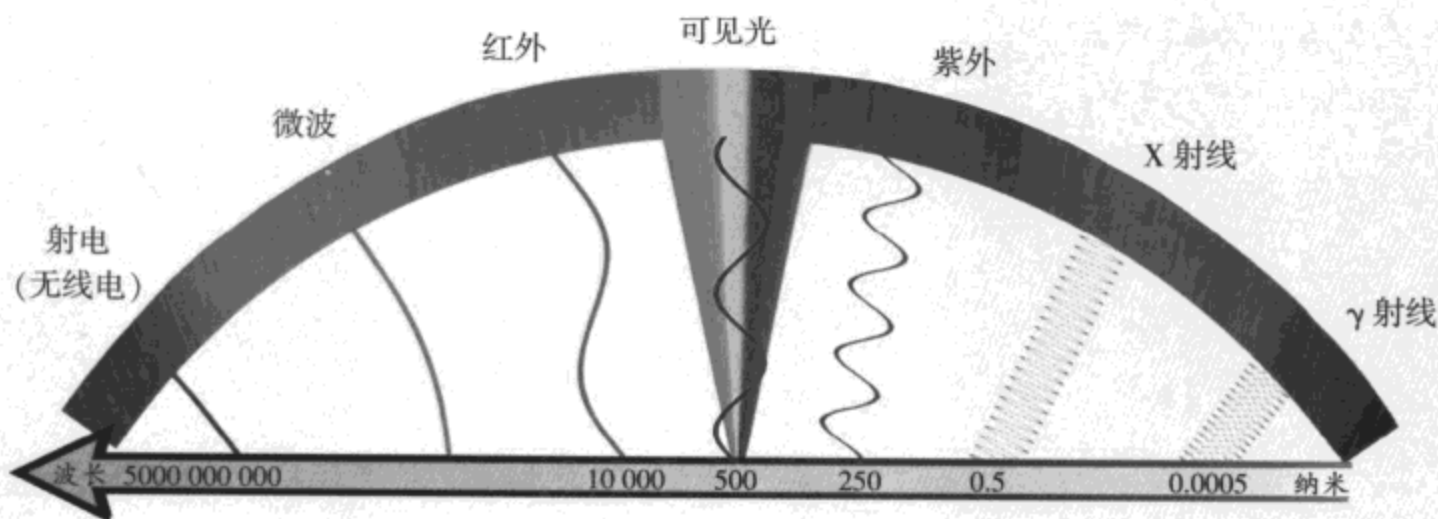


图 1.17 电磁波的连续谱，按波长和频率排列（图中给出的波长以纳米为单位）

子、红外线波——红外光子、射电（无线电）波——射电光子。实际上，以 c 表示真空中的光速，波长 λ 和频率 ν 有互算关系 $\lambda\nu=c$ ；相应于频率 ν 的光子具有能量 $h\nu$ ($h=6.626\times10^{-34}$ 焦耳/秒，是普朗克常数)。设想一个光子作为一个小能量的“波包”，每个光子有一定焦耳的能量值（1 焦耳就是 1 秒钟发射 1 瓦的功率）。你也可以认为光子是一段光波，携带着能源穿越空间。

假如你可以把光波的速度减下来，那会看到什么景象呢？设想将小石块投进池塘，你会看见一系列的圆圈从石块击水点向外移动，这些圆圈就是有高峰和低谷的波。波长就是邻近两个峰的距离，而频率就是你看到每秒钟通过某个定点的波峰数目，光也以类似方式运动。光有速度（每秒 30 万千米）、波长（通常以公制距离单位表示）和频率（以每秒钟波峰通过的数目表示，称为赫兹，简称赫）。当你开亮 100 瓦的灯泡时，它每秒钟发射出约 10^{20} 个光子，而其余的能量变为热量耗散。灯泡发射的光波频率为 400~670 太赫（1 太赫= 10^{12} 赫），而天文学家则可以把同样的光表述为波长 450~750 纳米的辐射。

光波按波长分布的谱称为电磁（波）谱。电磁谱包含从 γ 射线、X 射线、紫外线到可见光、红外线、射电（无线电）波的几个波段。如果将电磁谱的全部波长在美国橄榄球球场（长度为 91.4 米）内展开，那么，我们眼睛看见的光（可见光波段）就仅仅在 0.0000003 米宽的范围内——这比球场割草的刀锋还窄。目视天文学就是在这么窄的波段内得出其一切成果，因而可以给你一个概念——当我们能在其他波段观察宇宙时，该会了解到多么多的东西啊！

为了让你对光的性质有一个粗浅认识，我们假设你在炎炎夏日里在户外晒享日光浴。这时，可见光的光子进入你的眼睛，使你能够看到周围的环境。假如一阵暴风雨刚刚过去，你就可以看见彩虹中有不同波长的光。同时，你能感觉到太

阳射来的红外线很温暖，而一些紫外辐射会烧灼或晒黑你的皮肤。太阳还发射出更高能量的紫外线和 γ 射线辐射，但由于地球大气把它们的大部分屏蔽掉了，所以你躺在沙地上就不会受到这些辐射。

现在，把上述经验转向星空观测。宇宙的各种天体都发出辐射，常常是很多波长的辐射混合在一起。人眼观测仅限于一个波段——光学的或可见光的波段。当你直接用肉眼或望远镜扫视星空时，你观测到发射可见光的天体。假如月亮或行星引起你注意，你看到的是它们反射过来的太阳可见光。它们不产生自己的可见光，而只是反射太阳光。由于恒星和星系确实产生它们自己的光子，提供可见光辐射，所以我们可以观测到它们。

假如你有一双可以看见多波段的全能眼睛，观测到的宇宙就大不一样了。你将能够看到发射各种不同波长辐射的天体！首先，从电磁谱的射电（无线电）端波段开始，射电的波长范围为 1 厘米到 1000 米。你的射电接收器会使你调谐找到星系中心区，那里有很强的射电信号，说明存在着物质喷流，而喷流实际上是从大质量且高能的天体处流出的。蟹状星云的射电图像在它的脉冲星周围最亮。这颗脉冲星是体积很小但质量大的中子星，自转很快，每秒钟绕其自转轴转 30 次。你也会发现木星的射电信号，这是粒子绕木星磁力线回旋而获得能量才发射的强信号。肯定地说，虽然这些剧烈活动产生高能信号，但当它们到达你的射电感应器时，它们却是非常微弱的。

假如你可以看得见射电信号的所谓微波亚段（波长 1 毫米到几厘米），你会发现分子云（例如存在于猎户星云中的分子云）特别亮。你也会有能力“看见”宇宙创生后缓慢冷却的余晖——恒星和星系的某种斑驳的低色背景。再一次，你得费心用射电感应器去探测这些微弱信号。

红外线的眼睛会让你看到宇宙在室温或略高温下的天体所发射的能量。它们发射波长从微米到厘米波段的辐射。你会看到什么？冷的恒星（常称为褐矮星 18 或亚恒星体）、行星、恒星之间的粒子云、恒星际分子、星云以及所谓的红外星系会展现在你的眼前。

可见光的眼睛（这是你现在拥有的）可以让你看到波长 400~700 纳米波段的光，很多天体发射或反射可见光波段的光。它们向你展示了丰富的星空，但却不是全部。尘埃妨碍你深入观测天体的心脏，或让你感受不到宇宙中具有最高能量的事物。

紫外波段（波长 10~400 纳米）的眼睛可以让你鉴别恒星际气体云中存在的元素，测量气体云的密度和温度，观测来自年轻热恒星的辐射“吃掉”孕育它们的分子云。



图 1.18 电磁谱也可以按温度（绝对温度）排列，显示从高能、高温天体和过程的辐射到最冷、低能天体和过程的辐射的波长范围

宇宙中最高的能量过程发射最高能量的辐射：X 射线和 γ 射线。它们的波长很短——小于 10 纳米。X 射线的眼睛早已是许多科幻小说的素材，同时也是“X 射线眼镜”广告所吹嘘的——能让我们透过人们的衣服而看见他们的骨骼。但是用真实的 X 射线眼睛，你只会看到宇宙中最高能量的事物。宇宙中最高能量的事物发出 X 射线形式的辐射。对一个 X 射线探测仪来说，宇宙是具有百万度高温，急剧加速的天体进行异常、剧烈变化并且拥有可能毁灭像恒星这样的稳定天体的令人难以置信的强磁场的场所。你会看到热的气体、星系核、黑洞周围区和（当彗星穿进高度带电的太阳风流时）发射 X 射线的奇特彗发。

宇宙中最高能的过程放出 γ 射线辐射，它们的波长极其短（约小于 0.1 纳米），能量极其高。拥有 γ 射线眼睛，你看到的将主要是超新星爆发、黑洞周围区以及被称为 γ 射线暴的神秘天体。

在某种意义上，我们确实已经有多波段的研究者。他们是提供以自然界未曾给予人类的多波段“眼睛”（观测仪器）的（专业的和业余的）天文学家。通过使用地面望远镜和太空轨道仪器，这些研究者设计了很多方法来研究光的各种性质。

天文学：观测的科学

观测是天文学的基础，是科学方法的第一步——从解剖学到动物学的一切科学研究的一种框架。一旦观测者看到一个物体、事件或过程，下一步就是对其进行记述，然后，观测者会提出一种假说进行解释。这时就引起别人的兴趣了，特别在天文学上更是如此。一旦观测者形成一种假说，就打开了探索其他很多可能性的大门，就像解释观测那样容易。比较理想的是，一旦一种假说提出，其他天文学家就能够用它去预言相似的事件或者稍后的观测。研究者会再次引用观测来验证该假说。成功的观测还会验证预言及其所据假说的有效性。天文学的每个发现——从确定月亮怎样形成陨击坑到有关宇宙年龄的最新理论——都依赖于这种

寻求成功的严谨方法。

大多数天文观测可以分为3类：摄像、光度测量和光谱学。射电观测由类似于卫星电视接收（天线）盘但更大的高灵敏接收（天线）盘收集天体信号。在摄像中，信号被记录在感光胶片或玻璃干板上，或者被电子摄像机捕获在电荷耦合器件（CCD）上。现在，很多人购买了数码照相机或数码摄像机，它们都以CCD取代底片来摄录影像。电荷耦合器件是多元阵列的光电探测器，包括大量（可达数百万）极敏感的“像元”。每个像元都是微小的半导体晶体管，受光照射就在CCD上生成电子潜像。CCD收集的潜像信息传送到显示屏而呈现出图像，或输入电脑储存、处理和分析，最后显示为良好图像。用与这一概念类似的程序处理射电望远镜阵列收集到的数据组合，可以形成射电图像。

有时，一架望远镜对向的是一个天体密集的视场，比如星团。假如我们正要研究星团中的一颗星，如果仪器能把这颗星与其他星分隔开，将对研究非常有帮助。这就是空间分辨的概念，即在天体密集的视场中区分彼此靠近的天体，并能生成它们清晰的图像。

宇宙中的某些天体在极其迅速地变化，而科学家如果能够观测到尽可能多的变化，所了解的就会更多。虽然附加在望远镜上的照相机在观测过程中可以多次摄下观测对象的图像，或者长时间地观测一个天体（这是人眼做不到的），但是普通照相机和单纯的CCD可摄图像的数量有限。于是，人们用专门的照相机和探测器来捕获天文事件的发生过程。这就是高度瞬时（时间）分辨的概念，而最好的仪器系统能够在几分之一秒的时间内拍很多“快照”。

20

“光度测量”是对来自天体的光的强度进行测量，而它常常依赖于可以进行时间高分辨记录的仪器。可以认为，光度计类似于闪光摄影所用的灵敏曝光表。例如，光度计常用于测定变星的光强度变化。测定恒星和宇宙中的其他天体的光强度是极其重要的，因为它们的亮度或星等的确定就源于这些研究。

天文学家时常会谈及8星等的恒星或5星等的彗星。星等的数值是表示一个天体跟其他天体比较的相对亮度。恒星越亮，其星等的数值越小，而暗星的星等数值较大。天狼星是夜空中最亮的恒星，它的视亮度是-1.5星等（译注：星等的负值越小，视亮度越亮），老人星的视亮度是-0.7星等，参宿四的视亮度约为0.5星等。在理想情况下，我们用肉眼可以直接看到的最暗恒星为5星等或6星等左右。在太阳系中，太阳的视亮度是-27星等，而遥远的冥王星的视亮度是16.8星等，一些遥远暗星系的视亮度为30星等以上！

不同的光度计测量不同波段的辐射，因此有一整套用来测量红外光、紫外光以及可见光的仪器。（不同波段）光度测量是进行天体分类的一种很系统化的方

法，也是观测（来自天体的）光输出变化怎样影响它们展现给我们的方式的系统化方法。

“光谱学”获取（混合）光并把（混合）光分解（译注：更常用它的同义词“色散”）为它的波长组分。我们都熟悉一些日常各类光谱：白色（混合）光通过棱镜而分解为多色的光带，太阳光通过雨滴形成一道绚丽的彩虹。这些都很简单地证明了太阳光（或白色光源的光）包含光谱上所有波长的辐射。

假如我们仅仅依赖未色散的光来研究天体，就不能解答多种问题，而光谱学帮助我们解答这些问题。恒星际气体云的化学成分是什么？一颗恒星有多热？一颗彗星含有什么气体和什么冰？从一个星系流出的物质喷流有多快？光谱学的方法允许我们解答在研究恒星、星系、彗星、行星以什么方式发射和吸收光时所提出的这些问题。

最简单的光谱学工具是光谱仪，它可以很好地按波长把光进行分解（色散）。一个三棱镜就可以使光产生色散，但最现代的天体光谱仪能够收集光、色散（用衍射光栅）、将结果记录在底片上或转换成计算机数据。光栅是刻有细线的玻璃板或反射镜，当光照射通过光栅，就会因衍射而色散为按波长展开的很宽（波长细分）的光谱。在太阳光下观看致密的电脑光盘，你会发现其表面有很绚丽的连续彩虹，衍射光栅的工作原理也一样。

光谱学在化学上是一种强有力的工具，能够以很高的精度确定一种元素的标识特征（谱线）。你可以进行一个简单的实验——加热一种元素，研究它燃烧时发出的光。每种元素或物质（例如气体分子）有其特征“指纹”或特征光谱。一般来说，光谱看起来像平滑连续的色彩上叠加一些或亮或暗的谱线。光谱学揭示的天体信息就“编码”在这些谱线中。光谱分辨就是精确分开光谱上相邻光谱特征（即波长的差值）的能力。

19世纪，德国化学家基尔霍夫根据大量实验的结果，建立了光谱学的基本规律——基尔霍夫三定律，表述了元素燃烧时出现什么类型的光谱。基尔霍夫第一定律指出，热的高密度气体或一个白热的固体会发射连续光谱。

- 22 太阳是这一定律的一个好例子。我们每天都能看到太阳这颗黄色的亮星，但用其他波段的眼睛看，太阳则是很不一样的“怪物”。如果我们能用X射线或紫外线的眼睛观察太阳，我们就会看到它在那些波长的辐射。

基尔霍夫第二定律指出，热的低密度气体会产生所谓“发射线”光谱，即气体中最丰富的元素会在它的光谱上出现很亮的谱线。基尔霍夫第三定律指出，当通过较冷的低密度气体观察连续辐射的光源（比如一颗恒星）时，会产生吸收线光谱。吸收光谱的研究是确定在我们与恒星之间存在什么物质的一种特别灵敏的

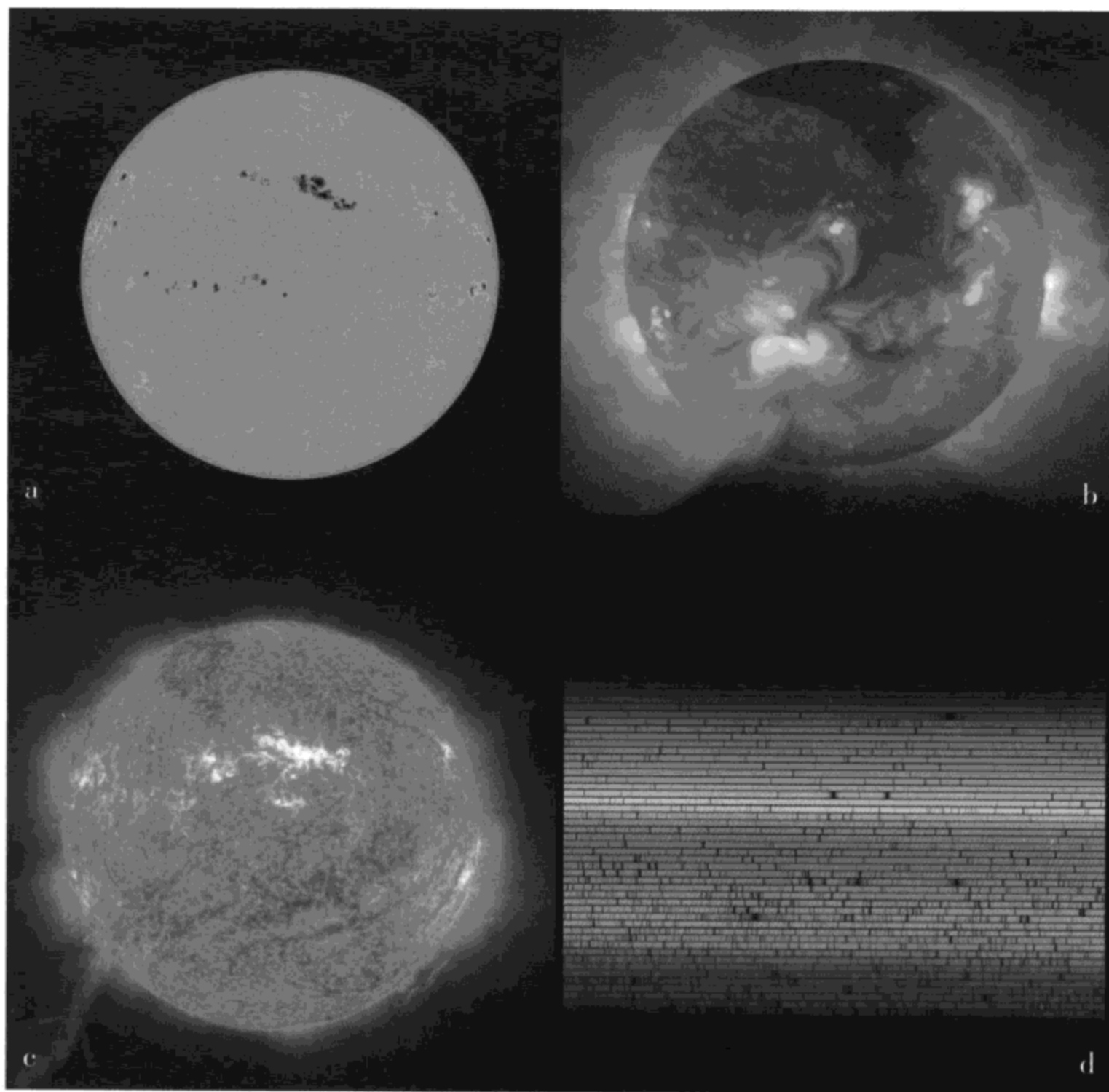


图 1.19 图 a、图 b、图 c 分别是可见光、X 射线和极紫外波段的太阳像，显示不同景色特征。在左下的极紫外太阳像上，亮的耀斑延展范围几乎有 40 倍地球直径大。图 d 是太阳光谱，分割为多个窄波段，依次上下排开，各波段光谱上的暗线（短竖线）是太阳大气中各种化学元素的吸收谱线

方法。某些恒星光谱上有一些确定波长的暗（吸收）谱线，那是由恒星际空间的物质云吸收而产生的。一个天文学家需要做的，就是比较实验室确定的元素光谱和恒星光谱，从而识别恒星的成分。太阳的吸收光谱和发射光谱表明，我们的这颗“父母星”富有多种化学元素。

天文学家根据他们的探测器的记录数据，绘制有助于分析所研究天体的像或图。我们已谈到天文探测器是大的“光桶”（收集来自各种天体的光），然而它们也是大的“数据桶”。来自天文探测器的所有数据经过某些数据处理，产生大

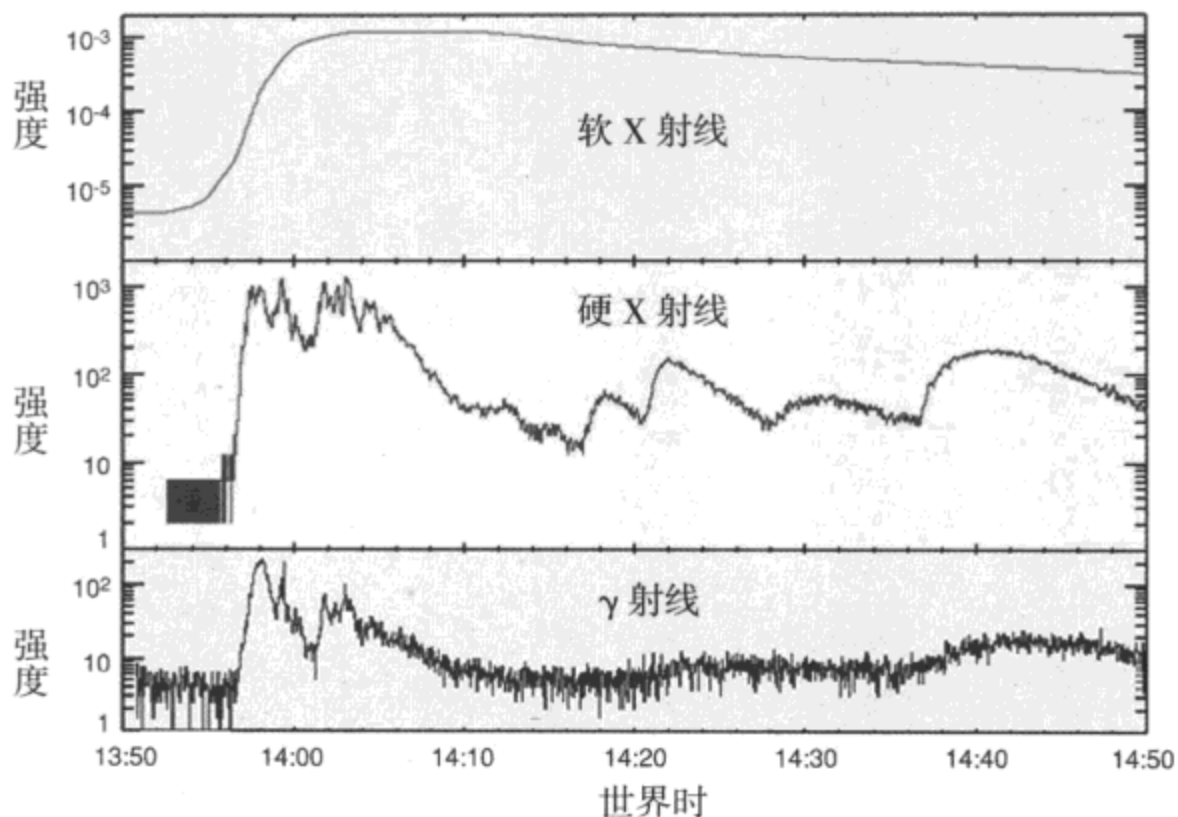


图 1.20 天文数据常用平面 $x-y$ 坐标图表示。这是一次太阳耀斑期间 1 小时内的辐射强度变化，该耀斑发生在 1989 年 3 月 6 日，两个卫星记录了太阳的 X 射线暴。数据来自 GOES 气象卫星和 SMM [太阳（活动）极大使命] 卫星，它们观测研究太阳耀斑期间释放的高能辐射。图中，时间从耀斑刚要爆发之前开始，追踪耀斑期间的高输出辐射，然后画出耀斑平息时的信号逐渐衰退。这里并列画出三波段情况。辐射强度标如下：对于 γ 射线，每平方厘米每秒 1~100 个（光子）；对于硬 X 射线，每平方厘米 1~1000 个（光子）；软 X 射线则为 10^{-6} ~ 10^{-3} 瓦

量的天文数据。处理所有信息的一个重要方面是将其图形化。我们都喜欢行星和星系的“美妙图像”，而这些图像对于天文研究也很重要。许多数据处理工具帮助天文学家把信息转化为便于进一步研究的像，包括将人眼看不见的、只能在其他波段看到的“伪彩像”（假彩像）。在这些情况下，通过“有和无”的（假）彩色信息模拟，我们可以看到在实际波长看到的天体是什么样子。在本书中，除了很多可见光图片之外，我们也给出很多以这种方法绘制的红外图片和紫外图片。研究天文数据的另外一种方法是提取信息并将其在曲线图和表格中表现出来。虽然这样的曲线图和表格看上去没有图片吸引人，但是它们对于研究者是极其重要的，它们所传递的信息与图片传递的信息同样令人兴奋。

天堂寻宝

那么天文学家观测什么？我们的天文台的研究成果使我们对宇宙的认识大大不同于古代的人们，甚至不同于我们的上一辈。随着每个新探测器的诞生或每个天文项目的启动，我们的宇宙视域每天都在变化。虽然我们绝对不曾妄想探究宇

宙的全部，但从星空不断传来的信息流帮助我们综合对宇宙的认识。从距离最近的行星到可观测的宇宙极限，人们已经取得了卓著的成果。

我们之所以对太阳系感兴趣，是因为我们需要了解地球的起源和演化。我们的姊妹世界——太阳系的众多小行星、彗星和卫星是绚丽和多样的，它们为我们了解太阳系形成期间的环境条件提供了许多信息。与我们的家园行星——地球相比，每颗行星都是一个独特的世界，有的是我们很熟悉的，有的则完全陌生。

太阳系的其他行星经常遭遇变化。我们得到的证据来自这些行星的大气过程和表面过程，火山活动、暴风、洪水和冰川运动不断地改造行星表面。因此，如果想完全了解行星，就需要经常观测这些变化。举例来说，世界各国的天文业余爱好者和专业天文学家不断地观测火星，关注火星大气或表面的任何变化。2001年，观测者们对火星进行密切的观测，希望能发现“闪亮”。据预言，当太阳、地球、火星处于某一特殊的几何位置时，火星表面的一定区域会发生一系列“闪亮”。对“闪亮”的一种最好的解释是：在火星的斯基亚帕雷利（Schiaparelli）陨击坑内的沙丘上有薄冰层，它像反光镜那样把太阳光反射到地球上来。闪亮确实发生了，全世界的观测者们分享着他们对这一特殊现象的观测记录。几个星期后，天文学家观测到火星上在6月末开始出现沙尘暴，遮蔽火星几个月。将地球表面的观测结果与太空观测结果相结合，人们得到了红色的火星上发生变化的更完整画像。

天文观测并不仅限于观测遥远天体上的变化。太阳系中有大量尚未发现的小天体，其中有很多具有可能撞击地球的危险，地球处于它们的撞击威胁中。这是一些国家正在开始认真考虑的一种威胁。美国航空航天总署和其他机构正在带头研制更灵敏的探测器和实施自动化巡天，搜寻在太空穿梭的小行星和彗星，以便在它们有可能撞击地球之前发出预警。

除了大行星和令我们担心会带来“世界末日”的小行星，宇宙中还有难以计数的恒星，仅在我们银河系就有大约2000亿颗恒星。这些恒星又组成了难以计数的星系（每个星系至少有10亿颗恒星），延展到我们能够观测的遥远处。在一片星场中，无论我们观测哪里，我们都有可能看到处于生存各阶段的恒星。我们使用探测器，分析观测到的证据，去破解一颗恒星的演变过程。在一些星云中，我们正在探索恒星诞生的隐藏秘密。在其他星云中，我们观测那标志着一颗恒星的光辉一生结束的爆炸事件。

恒星的一生——从形成到死亡的数百万年——引诱着许多天文学家探讨，这也是天文学的魅力所在。一些恒星独自在宇宙旅行，但也有很多恒星作为双星、三合星和较大星团的成员，在宇宙穿行。有些恒星在轨道上相互绕转，看起来像

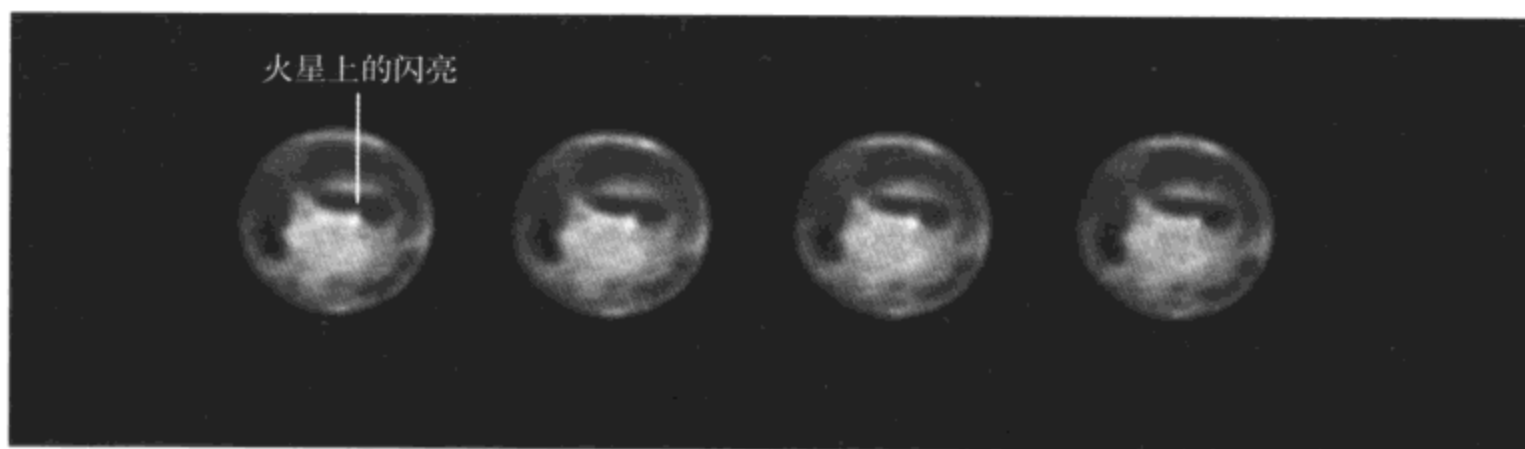


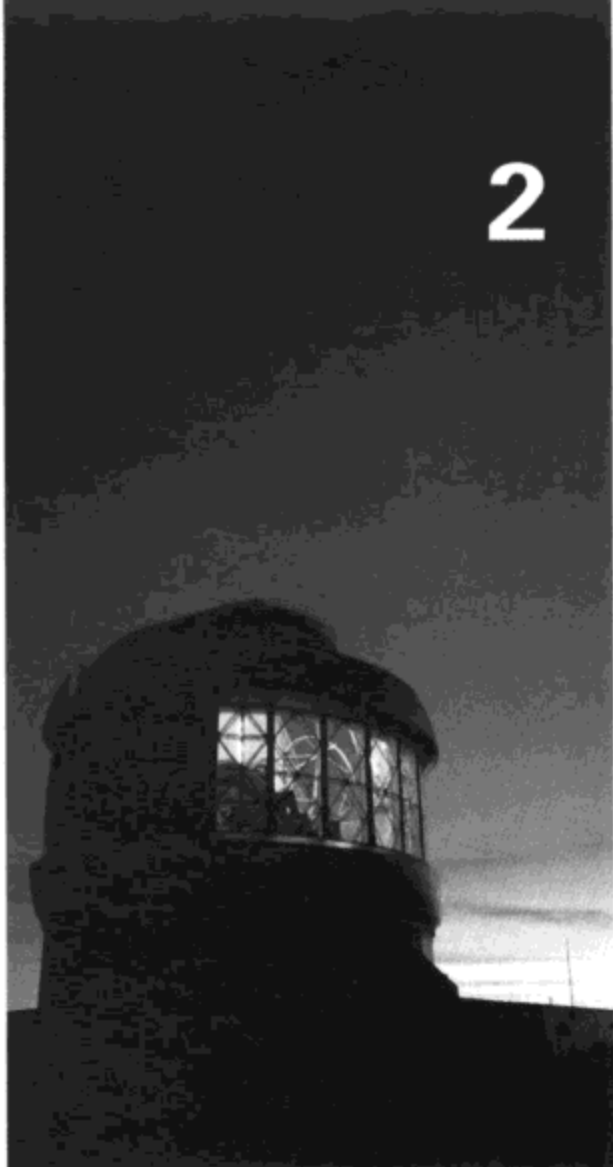
图 1.21 在 2001 年 6 月 7 日的早期观测中，天文业余爱好者和专业天文学家组成火星观测组，在火星赤道附近的艾斗姆 (Edom) 岬区观测到一系列表面增亮。图中一系列的图像显示火星视面中心偏右出现白色闪亮。需要特别指出的是：这组图片是人们在火星发现闪亮时，从大约 7000 万千米远的地球上用很多小望远镜实时抓拍制作的

行星系。恒星的特性——自转速率、化学成分、（运动）速度、年龄、颜色和温度——对天文学家而言都是热门研究课题。

众恒星所在的星系为我们认识宇宙的形成、各种天体的密集度甚至预测宇宙的遥远未来提供了一些线索。星系中有恒星诞生区、黑洞、恒星死亡处，研究其他星系的这些过程和天体，可以为我们研究自己所在的银河系所发生的事情提供重要线索（译注：因为某些星系的演化阶段与银河系不同而有关过程更显著）。

天文学家也寻求解答那些目前的答案还不完善的问题。虽然我们把宇宙中的客体分为行星、恒星、星系、类星体——它们似乎是离我们越来越远的天体——我们还没有找到离宇宙的“边缘”的距离。虽然事实上并不存在这样的边界，但是宇宙的创生时刻——宇宙形成并具备了形成星系、恒星、行星和生命的可能性的时刻，却是真实存在的。不幸的是，这一时刻是我们视力所不及的。

但是，不要懊恼！随着天文设备的功能不断增强，处在科学前沿的天文学家正在编列最早一批星系的形状和测量“大爆炸”后 30 万~40 万年发来的缕缕信号。他们正在分析不同波长光所隐含的信息，探索这一过程中令人惊异的东西。在穿越空间和时间的惊险旅行中，天文学才刚刚上路，还远未到达成功的终点。



在某种意义上说，望远镜都是时空“千里眼”。它们揭示星系是如此之远，以至于它们的光线历经几十亿年才能到达我们这里。天文学研究宇宙的一种优越性，就在于我们实际上可以看到过去。

——里斯 (Sir Martin Rees, 英国皇家天文学家)

真幸运，哈勃先生。

——戈拉斯弗耳德 (John Grunsfeld)

天文台：星空观测者的圣殿

人们感到天文台好像是神秘的地方，这是无疑的。对于不熟悉望远镜操作和技术的人来说，在某种意义上，望远镜似乎有点像表演魔术那样把宇宙带到我们门口。而且它们总是能做到这一点，即使它们的发明者或使用者对自己观测的是什么都不是很理解。

当我们探究天文学历史的时候，我们便做一次追溯过去的旅行，我们是通过最早的观星先辈们的眼睛来看世界的。实际上，古代天文学可能是在整日狩猎、牧羊、征战或其他白天工作之后仍有时间和精力熬夜的人所创建的，或者早期古人在白天做出了另一些天文成果。是什么点燃了人们对星空感到兴趣的第一个火花？是每天的日出奇迹吗？是什么时候有人终于了解月球圆缺的规则变化、决定绘制月球和太阳在星空的漫游图？当这些早期观星者看到星辰相对于熟悉的地面景观而东升和西落时，他们察觉到什么？

已知的最早天文台不过是像英国巨石阵或梅诺卡岛 (Menorca) 上的石头庇护所的那类石头建造，或者像秘鲁的马丘比丘 (Machu Picchu) 的拴日石那样的

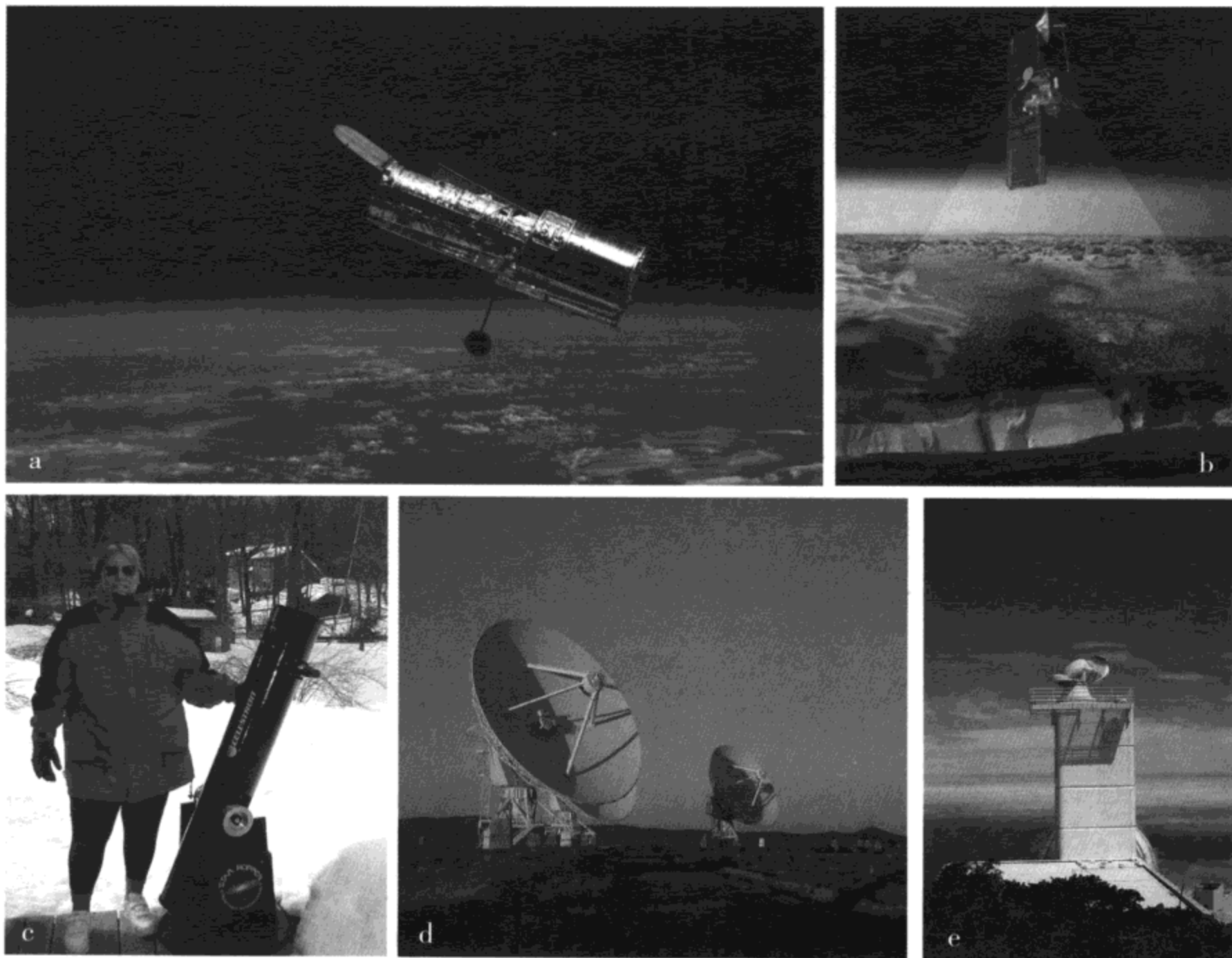


图 2.1 天文学家用人类最伟大的发明之一——望远镜探测宇宙中各种天体发出的各波段、各种形式的辐射。天文台散布在各地——天文爱好者的住家后院到平原、高山甚至太空。可以毫不夸张地说，望远镜就是我们观测星空的“千里眼”。现今使用的各个望远镜和天文台差别很大：哈勃空间望远镜（图 a）从环绕地球的较低轨道上进行天文观测，“火星奥德赛号”探测器（图 b）之类的行星探测器环绕别的行星飞行，将数据传送到地球；而地面的望远镜既有业余天文爱好者的小型地面望远镜（图 c），也有像美国新墨西哥州的甚大阵射电望远镜（图 d）那样的大型射电望远镜，更有像西班牙帕尔玛岛的瑞典 1 米太阳望远镜（图 e）

图 2.2（下页）光学望远镜常采用反光物镜。图 a 为夏威夷的莫纳基亚山顶上的 8.1 米口径的北双子座望远镜（南双子座望远镜位于智利的帕琼山），其反光物镜把光线聚焦到仪器阵上。图 b 为得克萨斯州麦克唐纳天文台大型拼镶镜面望远镜（Hobby-Eberly Telescope，简称 HET），其物镜由 91 面反光镜组合成 11 米×10 米的六边形，总聚光面积为 77.6 平方米。为了可以克服大反射镜制作困难的问题，新一代大望远镜常用这类可调整的多个较小反射镜做成组合物镜

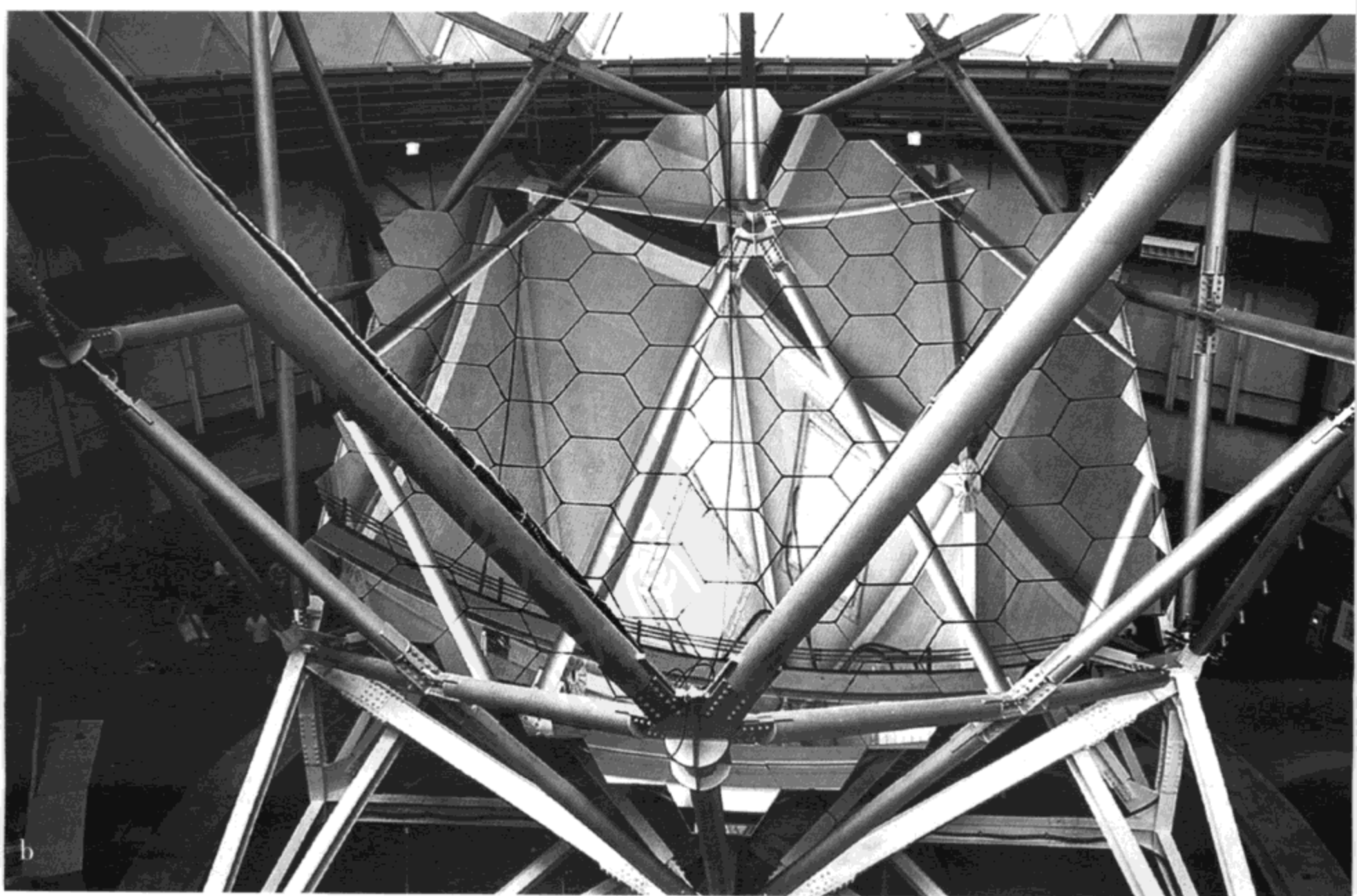
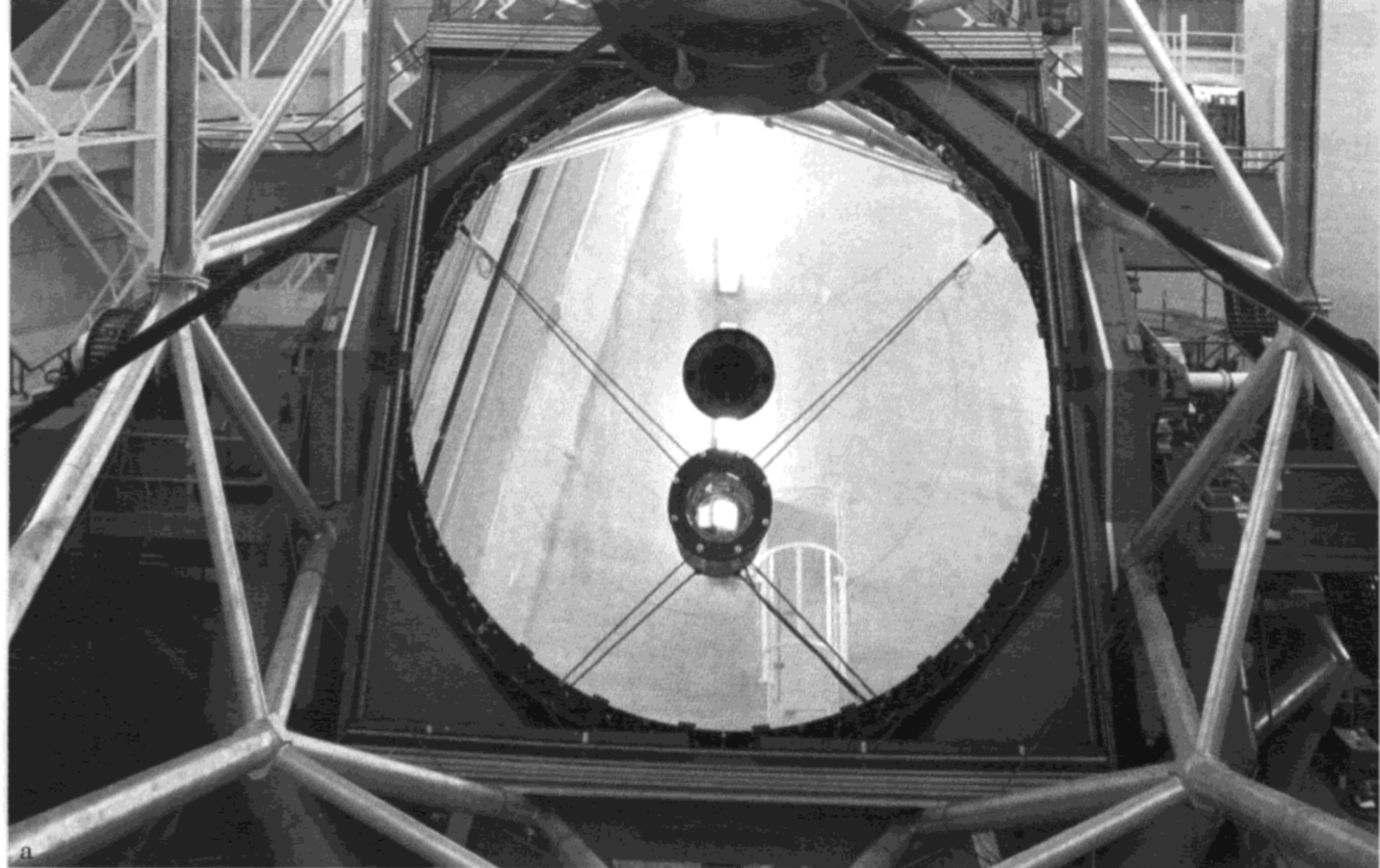
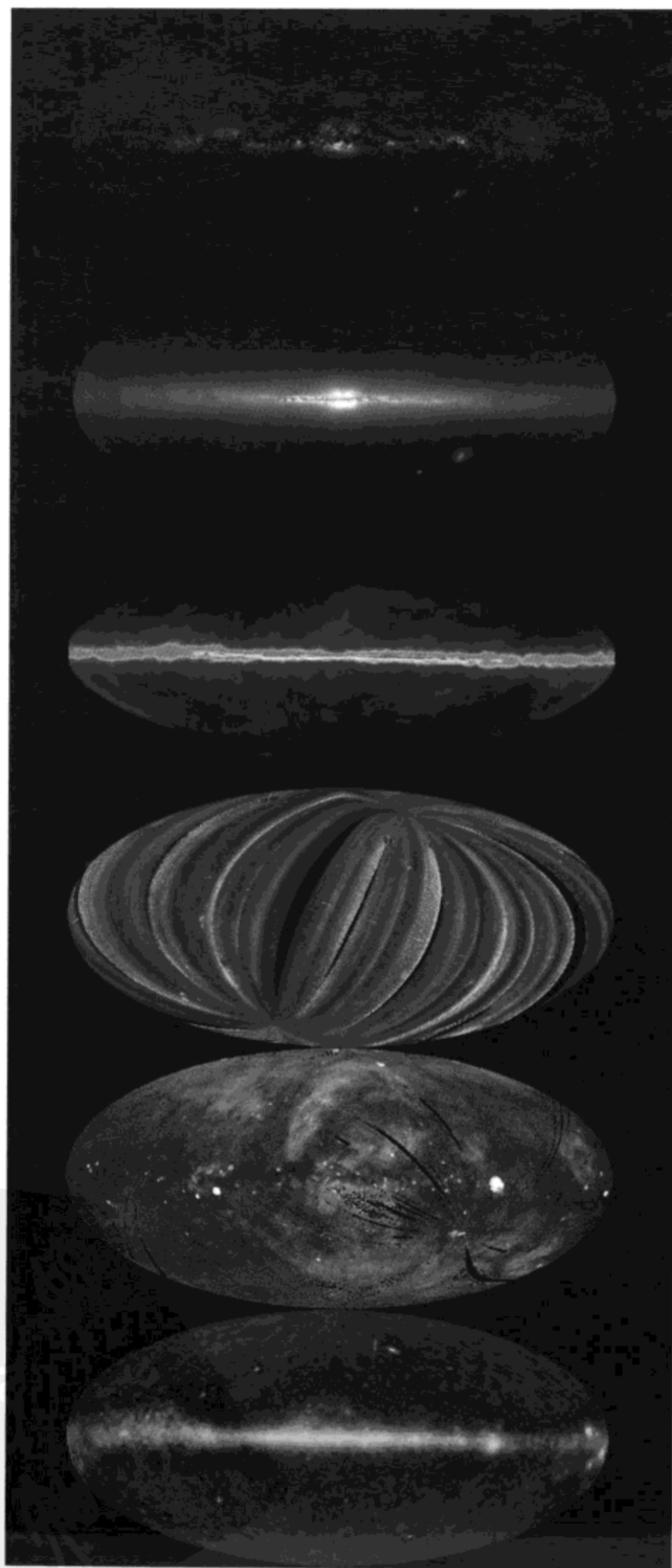


图 2.3 假如我们可以“看到”银河系发出和反射的所有辐射，银河系会是什么样的？银河系的多波段图像便于我们理解天文学家在不同波段的观测情况，图中从上到下依次是银河系在几个波段的情况：在可见光波段，银河系被亮的发光气体-尘埃云遮挡，也散布着一些吸收光的暗尘云；为了得到银河系的红外图像，天文学家绘制了波长约为 2 微米的红外图像（这是 2MASS——“2 微米全天空巡天计划”的一部分），这幅图片包含近 1 亿颗亮于 13.5 星等的恒星的资料；在射电波段，如果你装备了射电望远镜，就会看到像甚大阵射电望远镜所拍到的这幅银河系图像，虽然没有标示个别恒星，银道面也是很显著的，银道面附近的明亮源是脉冲星、恒星诞生区和超新星遗迹；极紫外探测飞船（EUVE）拍到的全天紫外图像，像上的条纹是飞船扫描技术原因所致，中心左面显示出猎户座及其 3 个明显恒星带；在 X 射线波段，伦琴卫星拍到的银河系图像上，最亮的斑点表明 X 射线发射增加的强活动区；在康普顿 γ 射线天文台（对宇宙最高能辐射敏感）拍到的巡天图像上，显示出银河系的热斑，这是利用卫星上的高能 γ 射线望远镜（EGRET）取得的第一个成果



在山上开凿的户外寺庙。这些遗迹确凿地证实了古代人对观测星空的兴趣，也正是这些观测者得出了星空运动和影响地球表面的四季变化的合理结论。

原则上说，现今的天文台跟最早的观天大帐篷没有太大的不同。的确，现代天文台比早期天文台大得多，而且装备了精密复杂的仪器。天文台已成为散布在地球上各大陆的景观，穿梭于近地空间和外太阳系的天文探测器也在进行着天文观测。同时，根据最近的统计，至少还有 300 多台专业天文设备和数千台业余天文爱好者的望远镜完满地填补地面天文台的观测空白。

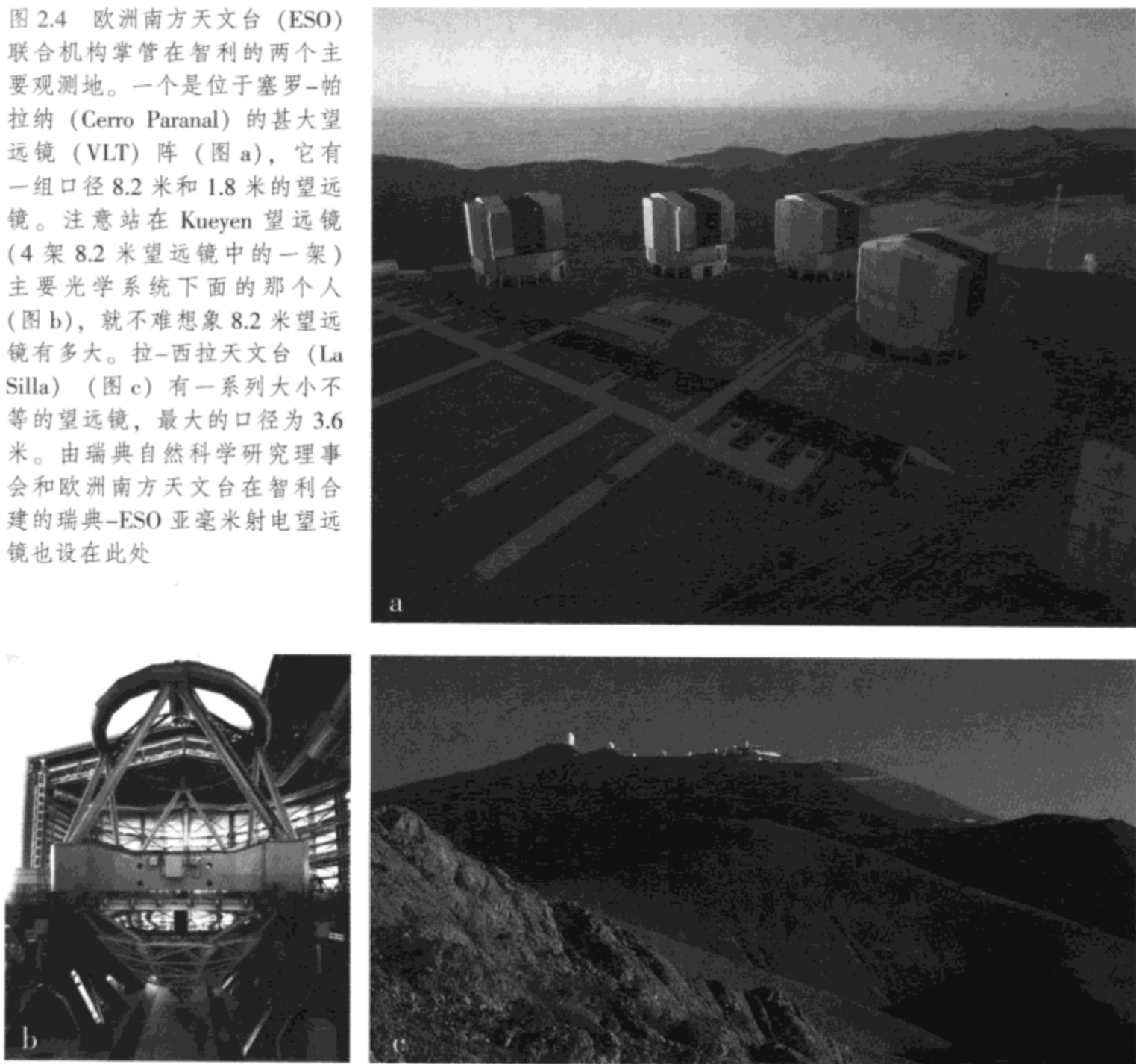
自 20 世纪 60 年代早期以来，我们观测星空的“千里眼”中增加了新成员：亚轨道飞行的火箭、气球、轨道卫星和航天飞船，其中包括媒体所报道的哈勃空间望远镜（HST）、钱德拉 X 射线天文台、太阳和太阳风层天文台（SOHO）、20 世纪 80 年代早期的红外天文卫星（IRAS）、20 世纪 90 年代的 ROSAT（伦琴卫星）使命、伊巴谷天体测量卫星以及其他很多飞船。

人们克服地球的引力，发射了几十个探测器（和 12 位宇航员）拜访月球。水手号飞船、麦哲伦号金星探测器、乔托号探测器（Giotto，在飞往哈雷彗星旅途中）、火星号探测器、海盗号探测器、火星探路者号探测器、火星全球勘测者号轨道探测器、火星奥德赛号探测器勘查了内太阳系的其他行星世界。随后，人们又发射了星尘号彗星探测器和“近地小行星会合”（NEAR）探测器。先驱者号探测器、旅行者号探测器和伽利略号飞船向地面传送了大量的珍贵资料，为我们揭示了壮观的外太阳系（但仅是探测）。在飞行了 7 年之后，卡西尼号飞船已进入环绕土星的轨道，将对土星及其卫星进行长达数年时间的探测[译注：2006 年 1 月发射的新视野号（New Horizon）飞船将在 2015 年探访冥王星和它的 3 颗卫星，而后探访其他的柯伊伯带天体]。

观星者如果经过长途跋涉，来到诸如澳洲的英澳望远镜的山顶天文台或者空间观测台发射地，就会对研究宇宙的复杂仪器大为惊叹。然而，现今的复杂探测器背后的一些原理实际上是相当简单的：尽可能多地聚集来自宇宙天体的光线（或其他波段的辐射）。天文学家获得哪种辐射取决于他们使用的仪器。不幸的是，没有一种仪器能够观测所有波段的辐射。于是，天文学家只能用不同的探测器去研究天体相应波段的辐射。

望远镜是最广为人知的天文观测工具。在望远镜的终端，有获得电磁辐射某波段（可见光波段、紫外波段、红外波段或射电波段）的设备。在很多望远镜上，用凹面反射镜聚集和反射光（辐射）到其他仪器或传感器（如胶片摄像机、射电接收机、CCD 相机）上。天文学家通过这些相机产生的图像，就可以了解到天体的一些性质，比如它的亮度、形状、位置以及与其他天体的空间关系等。

图 2.4 欧洲南方天文台 (ESO) 联合机构掌管在智利的两个主要观测地。一个是位于塞罗-帕拉纳 (Cerro Paranal) 的甚大望远镜 (VLT) 阵 (图 a), 它有一组口径 8.2 米和 1.8 米的望远镜。注意站在 Kueyen 望远镜 (4 架 8.2 米望远镜中的一架) 主要光学系统下面的那个人 (图 b), 就不难想象 8.2 米望远镜有多大。拉-西拉天文台 (La Silla) (图 c) 有一系列大小不等的望远镜, 最大的口径为 3.6 米。由瑞典自然科学研究理事会和欧洲南方天文台在智利合建的瑞典-ESO 亚毫米射电望远镜也设在此处



建造的望远镜越大, 可以获得的光 (或其他辐射信号) 就越多。但是, 任何望远镜的制造都受物镜大小的限制。一个大物镜可以聚集更多的光, 让使用者有机会观测更暗的和更远的天体。然而, 物镜不能无限制的大, 因为这要求支撑物镜的结构也必须无限制的大, 这显然无法实现。而且还有经费问题, 在确定建造多大的望远镜之前, 必须考虑经费的可能性。镜面的形状也是至关重要的, 它决定着入射光会聚而呈现优质像的能力, 而大的抛物面或曲面反射镜由于自身重量而变形就会导致像的畸变。为了改进这些缺点, 天文学家建造新一代望远镜时, 采用轻型镜的多镜组合, 镜面可以实时调整。在某些情况下, 他们把分散在很大范围内的很多探测器连接在一起, 进行入射信号组合, 用电子学方法合成观测星空的巨大“千里眼”。

正如我们在第 1 章所讨论的, 我们最熟悉的天文学 (那种我们去到旷野观测

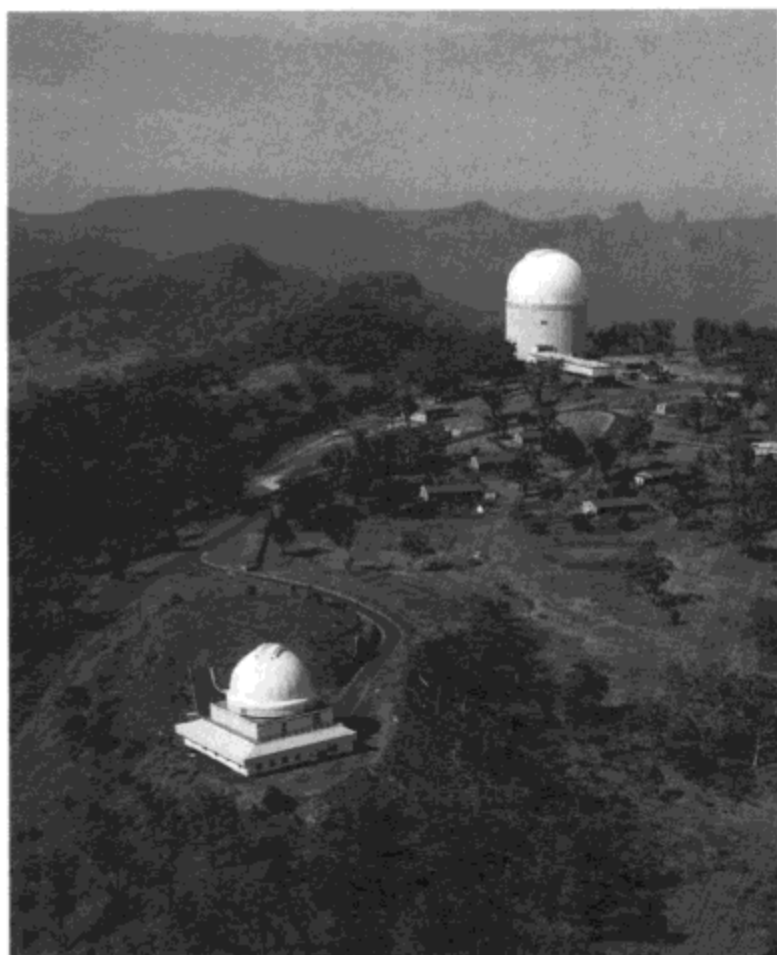


图 2.5 位于澳洲赛丁泉 (Siding Spring) 的英澳天文台 (AAO) 掌管两个光学望远镜——3.9 米的英澳望远镜 (上右) 和 1.2 米的英国施密特望远镜 (下左)

图 2.6 美国亚利桑那州图森 (Tucson) 附近的基特峰 (Kitt Peak) 是世界上天文台最密集的地方之一, 该山上最大的望远镜是口径 4 米的梅奥尔望远镜 (Mayall, 右面远处), 接下来的是亚利桑那大学的 2.3 米望远镜和美国“太空监测计划” (Spacewatch) 所使用的 0.9 米望远镜 (其功用是发现和研究近地小行星)。这张照片拍摄之后, “太空监测计划” 又配备了新的 1.8 米望远镜。在左面远处是 3.5 米 WIYN 望远镜, 由威斯康星州、印第安纳州、耶鲁大学、美国国家光学天文台合建。此山上的其他圆顶建筑内设有一台供来访者使用的望远镜、一台 0.9 米望远镜、一台 2.4 米望远镜、伯勒尔-施密特望远镜 (Burrell Schmidt) 和属于美国天文学研究西南协会的自动设备。三角形建筑是麦克梅斯-皮尔斯太阳望远镜 (McMath-Pierce) ——世界上最大的太阳望远镜, 它前面是真空塔望远镜——巨大的真空室几乎有整个建筑物高



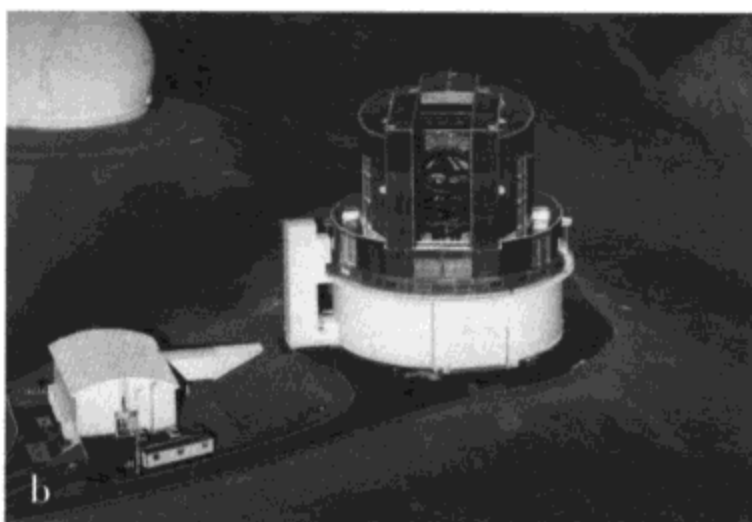


图 2.7 在“天堂”的天文台群。在夏威夷 4200 米高的莫纳基亚 (Mauna Kea) 火山上有光学望远镜、红外望远镜和亚毫米波望远镜，是世界上最大的天文台群。图 a：莫纳基亚火山现在一共装有 13 个设备，包括李生的凯克 (Keck) 望远镜、夏威夷大学望远镜、加拿大-法国-夏威夷望远镜、史密松 (Smithsonian) 亚毫米波射电望远镜阵、英国红外望远镜、美国宇航局 (NASA) 红外望远镜。图 b 为日本国家天文台在莫纳基亚安装的 8 米光学/红外昴星团 (Subaru) 望远镜。图 c 为英国、加拿大和瑞典合作掌握的詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 亚毫米波望远镜。李生的北双子座望远镜 (图 d) 是最近在莫纳基亚落成的望远镜之一，南双子座望远镜安装在智利 (图 e)

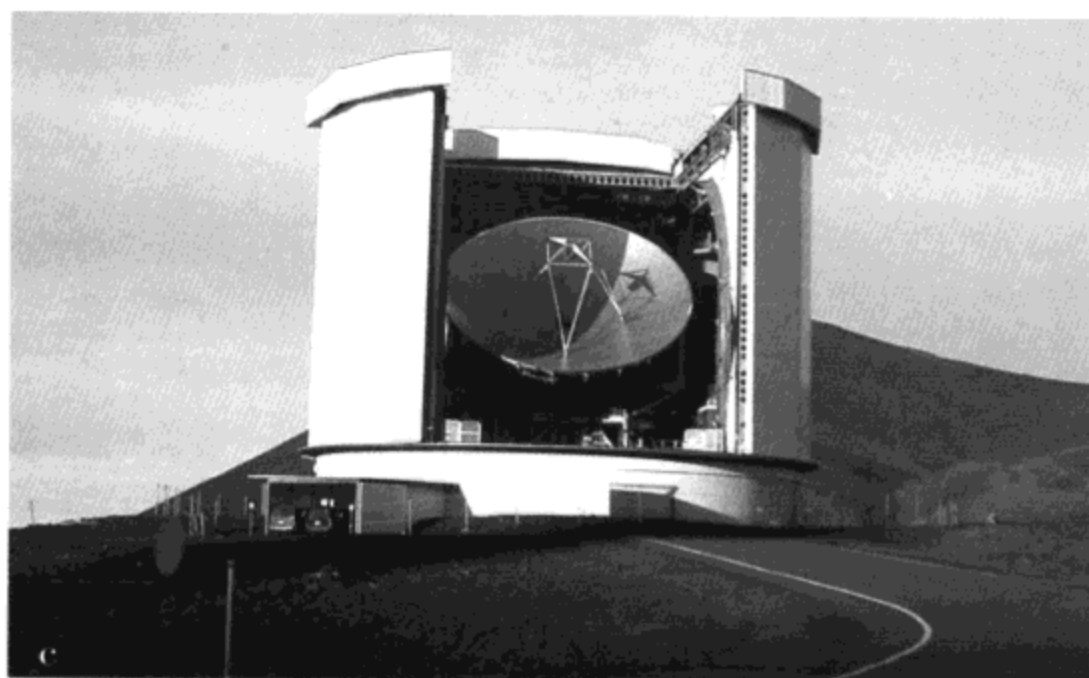




图 2.8 新墨西哥州萨克拉门托峰建有白色的理查德·B·杜恩 (Richard B. Dunn) 太阳望远镜，旁边为埃文斯 (Evans) 太阳观测设备——日冕仪



图 2.9 设在寒冷干燥平原上的阿蒙德森-斯科特南极站 (Amundsen-Scott) 的天文台可能是地球上最冷的天文台。这个南极洲亚毫米波望远镜天文台全年运行，主要观测星系中的原子和分子云的频谱



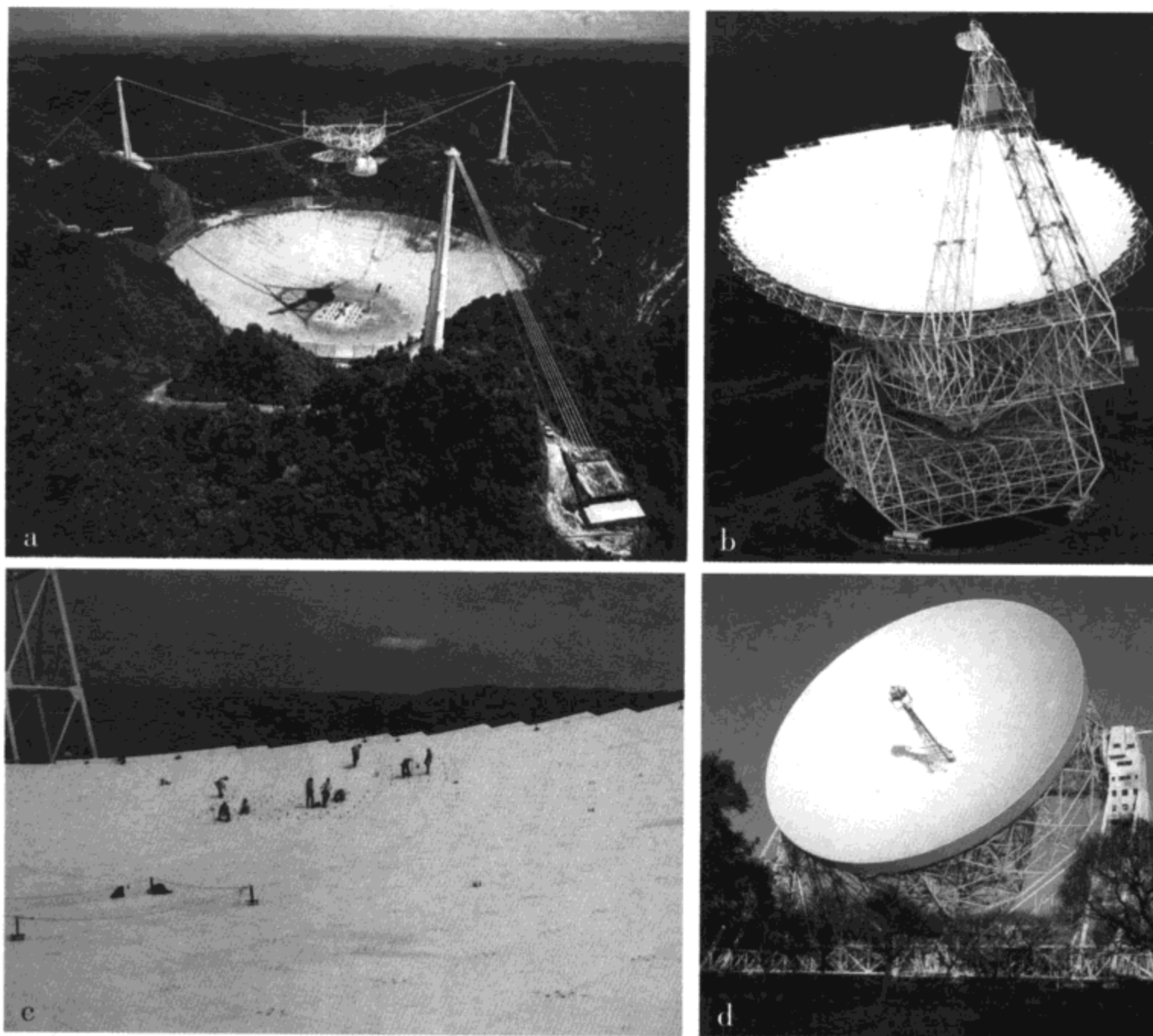


图 2.10 射电望远镜是成功利用“接收天线盘”接收辐射的很好例子。图 a 为波多黎各的阿雷西博 (Arecibo) 射电望远镜，其接收天线的口径达 300 米。图 b 为位于西弗吉尼亚的绿堤 (Green Bank) 射电望远镜，其接收的口径为 100 米。图 c 为在绿堤射电望远镜接收天线上进行焊接的建造工人，由此可以想象绿堤射电望远镜有多大！图 d 为英格兰焦德雷班克天文台 (Jodrell Bank) 的罗威尔 (Lowell) 射电望远镜。图 e 为美国新墨西哥州索科罗市 (Socorro) 西面的甚大阵 (射电望远镜)，射电天文学家常将一系列天线阵列连接为一个大的观测“千里眼”

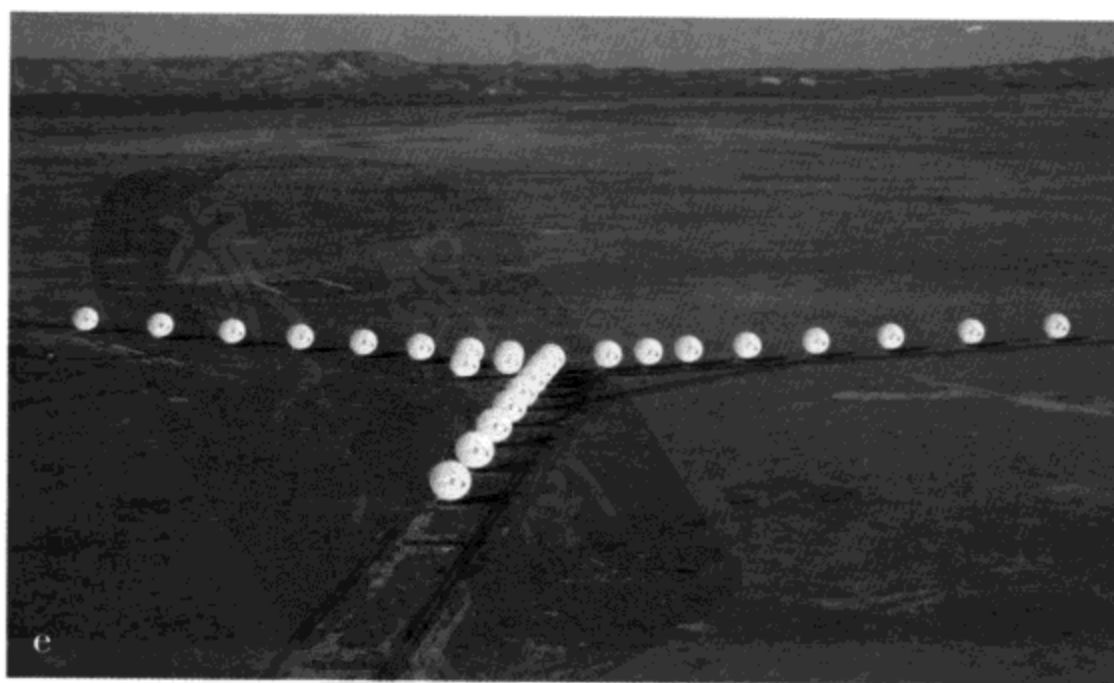
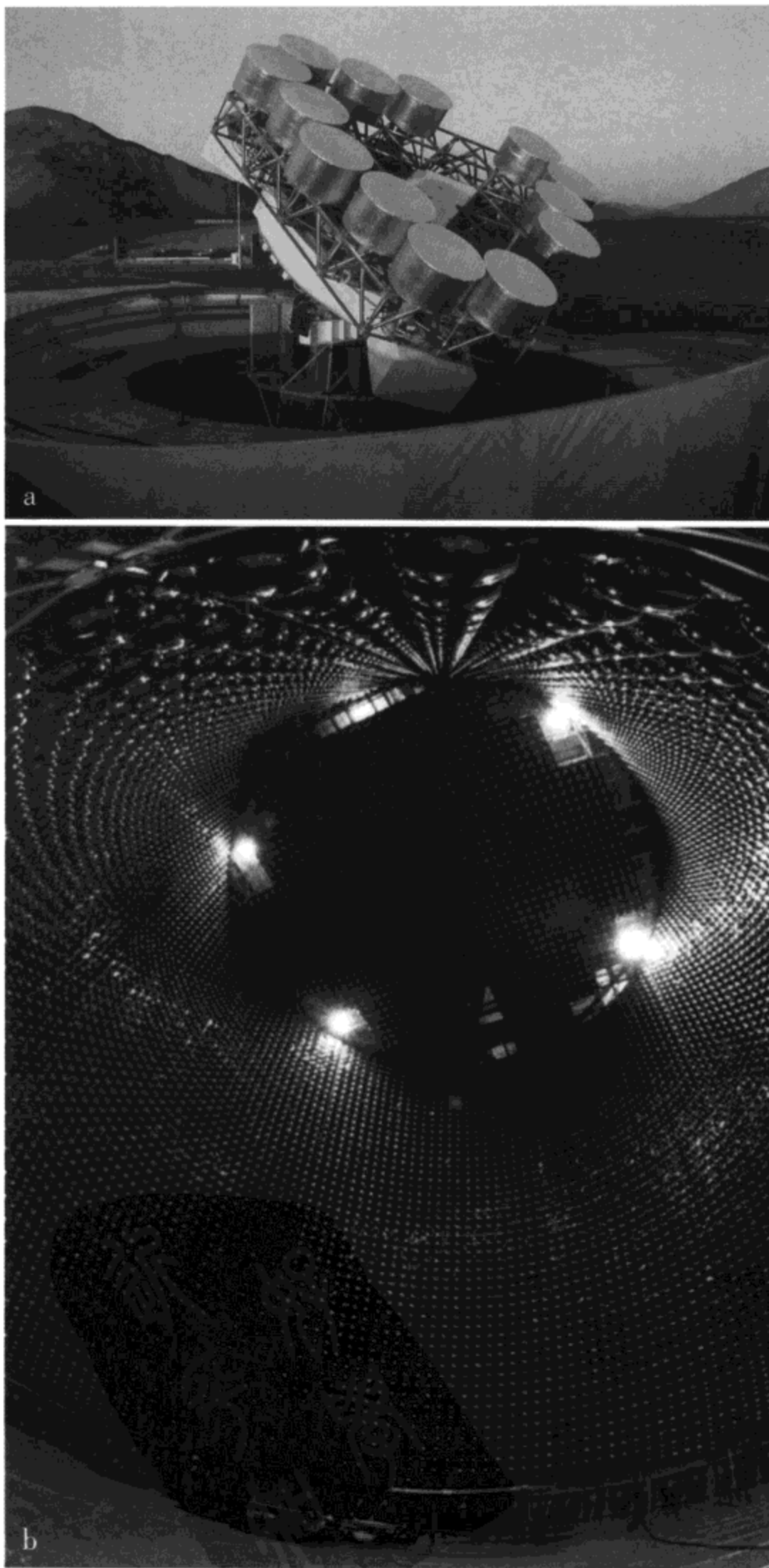


图 2.11 图 a 是一个很特殊的天文台——宇宙背景摄像器，它专门用于研究从宇宙早期遗留下来的“宇宙微波背景辐射”，它位于智利安德斯山 5080 米高度的地方。或许很难想到一个充满液体的地下大容器可以作为天文仪器，而超级神冈地下探测器（Super-Kamiokande）真的就是一个特殊的中微子“望远镜”（图 b）。中微子是太阳、超新星爆发、活动星系中心区发射出来的粒子，具有极强的穿透能力。研究者用超级神冈地下探测器和埋藏在南达科他州一个矿井中的中微子探测器（其主体是一个注满 615 吨四氯乙烯的巨桶），得到有关在太阳内部产生中微子的基本发现，并由此获得了 2002 年诺贝尔物理学奖



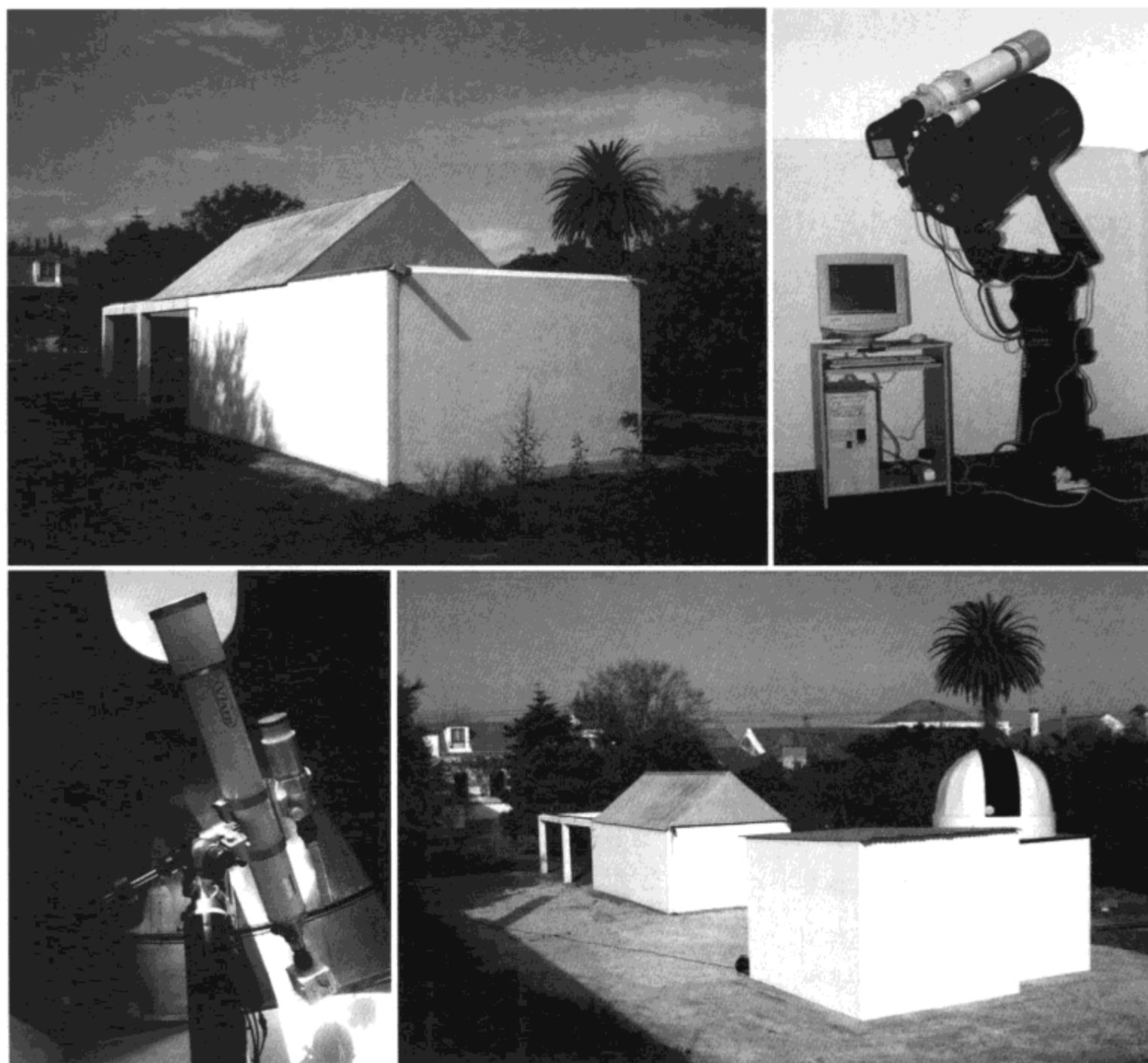


图 2.12 葡萄牙业余天文学家彼得罗·雷 (Pedro Ré) 的天文台和望远镜。白天，他是里斯本大学的一位海洋生物学家，而晚上回到他的天文仪器群中，观测从月球和行星到遥远的深空星系的各种情况

恒星和星系) 利用的是可见光，也就是我们眼睛经常看见的电磁辐射。光学天文学是在电磁辐射谱的很窄波段——从近红外到近紫外的波段进行的，实际上是测量波长为 350 纳米到 650 纳米的辐射，这几乎与我们目视观测的波段一样。我们的眼睛在白昼的最敏感波长——光谱敏度峰约为 550 纳米（这恰好大致匹配太阳光谱能量分布峰——太阳光谱能量的最高值的波长）。在黑夜，如果我们的眼睛已充分适应黑暗，则眼睛的光谱敏度峰约为 500 纳米。

让太阳光穿过三棱镜后照到白纸上，就可以看到彩色光带——太阳的可见光光谱，但看不到彩色光带两端之外的其他波段的太阳辐射。以射电天文学为例，为了探测来自天体的射电和微波辐射，天文学家使用很大的金属接收盘（天线）

聚集遥远天体发射的微弱射电信号，进行聚焦和放大，然后把它们转换为信号格式，从而得到射电“像”。射电信号可以由一个或一阵列的接收天线组成的“干涉仪”来聚集（这种方法也可以用于光学望远镜）。天体越暗，观测它的射电望远镜的接收天线的表面积就必须越大。一阵列的多个接收天线可以使研究者在更大的范围内聚集射电信号，而且加大各接收天线之间的距离也会提高分辨率，让研究者可以观测小的（或远的）天体的细节。

大多数天文爱好者都对美国新墨西哥州的甚大（射电天线）阵（VLA）非常熟悉。对于一般公众来说，那是电影《接触》中接收遥远的文明世界发来自信号的地方。实际上，射电天文学家用它的 27 个相互连接的接收机聚焦于发出射电的不同天体，诸如木星、脉冲星、活动星系核。有时，甚大阵会连接美国大陆甚至更远地方的射电望远镜，以得到一个射电源的更精细的“图像”。这是获得有趣发现的地方，因为阵列中每个望远镜接收到同样信号的时间略有差别，一旦用适当延滞和其他处理方法组合来自所有望远镜的信号，就可能形成一幅像。如果操作得当，所得到的图像细节就与用一个具有全部阵列大小的天线那样好，虽然对微弱辐射的敏感度仅如同各个天线面积总和那么高。

所有地面望远镜（不管它们在哪个波段探测）都受到地球大气和光污染增加等问题的影响。射电望远镜对无线电频率的干扰特别敏感，因而安置在远离繁华市中心和拥挤道路的地方。大气湍流导致星光闪烁，当你陪着爱人外出仰望星空时，闪烁的星光很有诗意，但如果你试图准确测量一个天体，那么闪烁的星光就会破坏观测流程和误导数据。同样的道理，光污染和噪声污染必然减弱来自暗弱的遥远天体的光和信号，也会导致观测失败。

地球上的“千里眼”

欣赏前面的天文台照片，显然可见，天文学家在地球上一些最美丽、最偏远的地方，甚至是自己家的后院开展观测工作。世界上的很多天文设备安置在山顶上（比如美国夏威夷、南美洲、欧洲以及澳大利亚、日本、中国的很多望远镜）和远离城镇灯光的荒野地区。另一些望远镜，比如美国新墨西哥州索科罗市附近的甚大阵（射电望远镜）或加拿大不列颠哥伦比亚省的潘提顿（Penticton）射电望远镜阵都位于远离城市的荒野地区和沙漠地区，希望避开汽车、电话、电视和无线电转发器的不和谐干扰。

虽然天文学家可以到地球上的“天涯海角”去，以避开大部分污染和大气干扰，但是他们仍在“气毯”——地球大气层下进行天文观测。他们发明了几种技

术来处理大气的影响。一种方法是对一个天体进行短时间的多次观测，这能有效地“冻结”地球大气产生的湍流，然后把个别像进行数学组合，推断“真实”像的细节，这就是所谓“斑点干涉测量”。

在某些波段，天文学家通过调节望远镜的反射镜或其他传感器来适应大气的变化，几乎可以克服大气变化的影响。这种技术称为“自适应光学”。从某一天体来的信号在经过大气时会受到扭折，一个似星点的可见光像看起来很模糊而不能用于研究。自适应光学系统可以进行大气扭折改正：（从地面）投射一束激光到高空大气中，从而创造一个人造“参考”星，然后通过分析它的光来确定大气把入射光扭折了多少；光学系统用此信息来迅速地改变自适应光学反射镜的曲率，补偿大气扭折的光，使得参考星呈点状。这种方法的妙处在于它可以实时进行——在观测过程中进行！自适应光学系统允许进行短时标（时间尺度）的光谱学和光度测量。这些系统让使用者实际上从观测上去掉大气影响。

最后，当大多数天文学家认识到无法从大气上空获得他们所需的资料时，几个研究组开创了地下深处的天文探测之路：一个装满极其纯净的水、连接很多探测器的大容器（被称为超级神冈地下侦测器）被放置在日本东京附近的神冈矿井中；在美国南达科他州，另一个注满干洗流体的巨桶被埋在一个铅矿井内多年。研究者用这些独特装置测量中微子的痕迹。质量极其微小的中微子是太阳、超新星爆炸、活动星系中心区发射出来的粒子。中微子的穿越能力特强，很难直接探测到它们。虽然困难，但也有几种探测中微子的可行方法。其中一种方法是让疾驶而过的中微子偶尔地与流体中的原子碰撞，然后用复杂仪器探测因碰撞产生的放射性元素。

天上的“千里眼”

正如我们已经讨论的，很多进行红外观测和亚毫米波观测的天文台与进行可见光观测的天文台一起，建造在地球的高山上，因为天体来的辐射在那里受到地球大气的吸收和扰动较少。出于同样的原因，科学家们开展了诸如“BOOMERanG”（Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysic，河外星系微波辐射和地球物理的气球观测）的研究计划（在南极洲将气球升至离地面约3.6万米的高空，进行为期十多天的探测，收集太空的宇宙微波辐射并进行分析）和亚轨（火箭）实验。但是它们都仅仅是解决大气影响的部分方案，为了进行X射线、紫外线和 γ 射线波段的天文观测，必须把仪器发送到远离地球大气吸收的空间。在某一时期内，有几十个观测卫星在环绕地球的轨

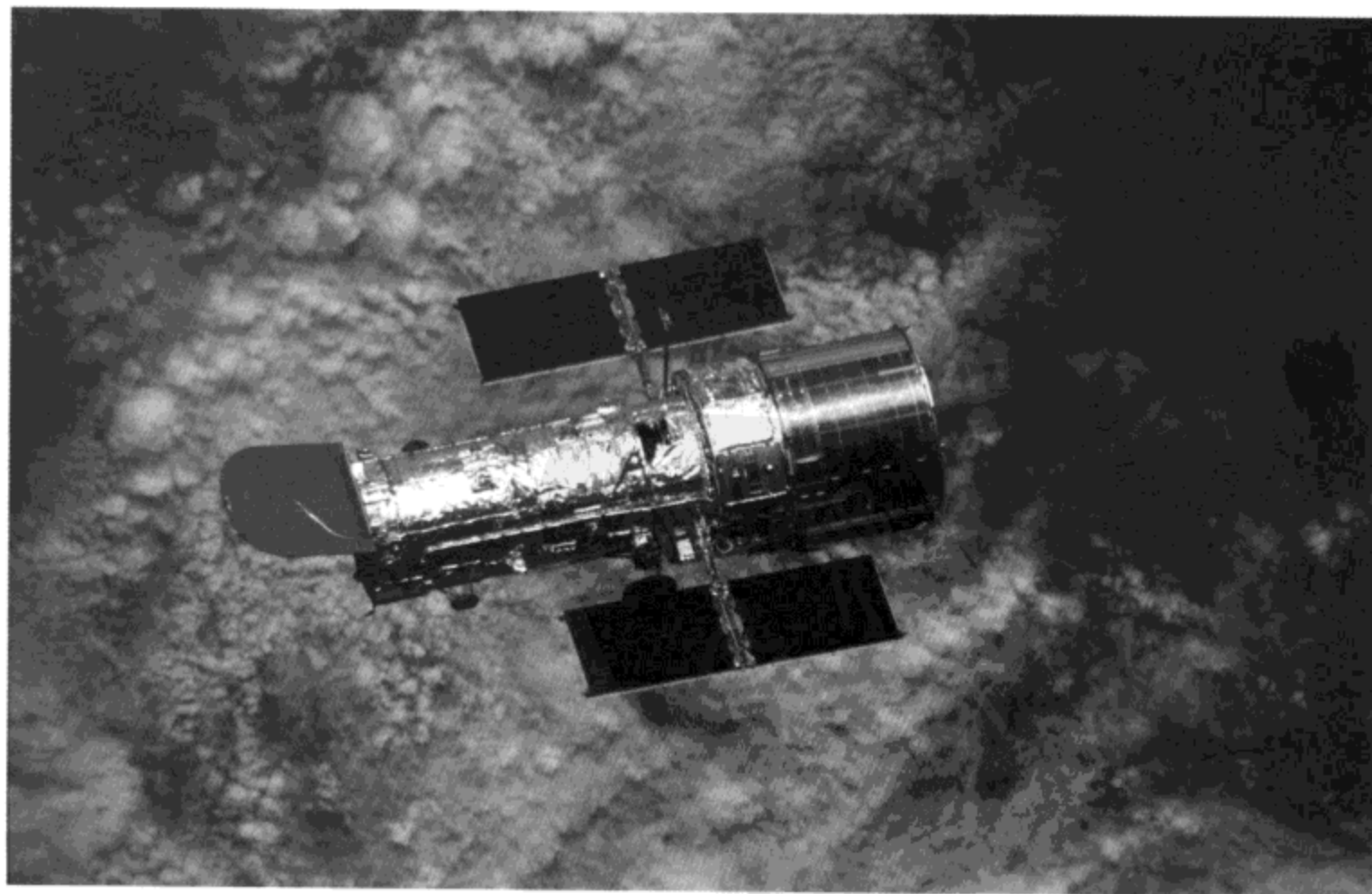
道上运行，像康普顿 γ 射线天文台和伊巴谷天体测量卫星等都在它们的使用寿命期间完成尖端科研任务。

40 现在还在轨道运行的观测台主要有哈勃空间望远镜、钱德拉 X 射线天文台、美国宇航局的太空红外望远镜。类似于其他（轨道上的和地面的）观测台，它们利用反射镜把光聚集到镜后的科学仪器阵进行观测。

哈勃空间望远镜（HST）的探测器对从紫外、可见光到红外波段的辐射都很敏感，天文学家由此获得了他们所期望的高分辨、多波段的宇宙图像。哈勃空间望远镜的关键部件是反射镜系统——经特殊制造的标准卡塞格林型望远镜。在卡塞格林望远镜中，从一个天体来的光进入望远镜筒，从主反射镜反射到第二反射镜，再向后反射并通过主反射镜中央的孔而进入各种科学仪器。

哈勃空间望远镜是 1990 年 4 月发射进入预定轨道的。在其多年的轨道运行期间，科学家在不同时间为其安装了 9 种不同仪器。宽视场 / 行星照相机（WF/PCs）和暗弱天体照相机（FOC）用于拍摄宇宙可视图象。新一代的宽视场行星照相机对从红外到近紫外波段的光都很敏感。从 1990 年到 1997 年，在哈勃空间望远镜上用的是紫外敏感的戈达德（Goddard）高分辨率摄谱仪（GHRS）和暗弱

图 2.13 以天文学家哈勃（Edwin Hubble）命名的哈勃空间望远镜是设计在轨道上运行的唯一多功能天文台。宇航员已多次拜访哈勃空间望远镜，进行了仪器更换和修理。按计划，哈勃空间望远镜将继续在轨道上工作至少到 2010 年



天体摄谱仪 (FOS)。而后, 取代它们的是近红外照相机和多天体摄谱仪⁴¹ (NICMOS, 一种红外敏感仪器) 及空间望远镜成像摄谱仪 (STIS, 设计用于研究天体在紫外和可见光波段的辐射)。高速光度计 (HSP) 是哈勃空间望远镜的“曝光表”, 它在 1992 年被拆下, 取代它的是修正光学系统。虽然不是作为科学仪器而制造的, 精密制导遥感器 (FGSs) 用于望远镜定向系统, 同时进行天体位置的精密测定。暗弱天体照相机也被拆下, 由高级巡天照相机 (ACS) 取代。有趣的是, 从哈勃空间望远镜上拆下来的暗天体照相机和反射镜已派上了新的用场——在华盛顿特区国家航空和航天博物馆展览。

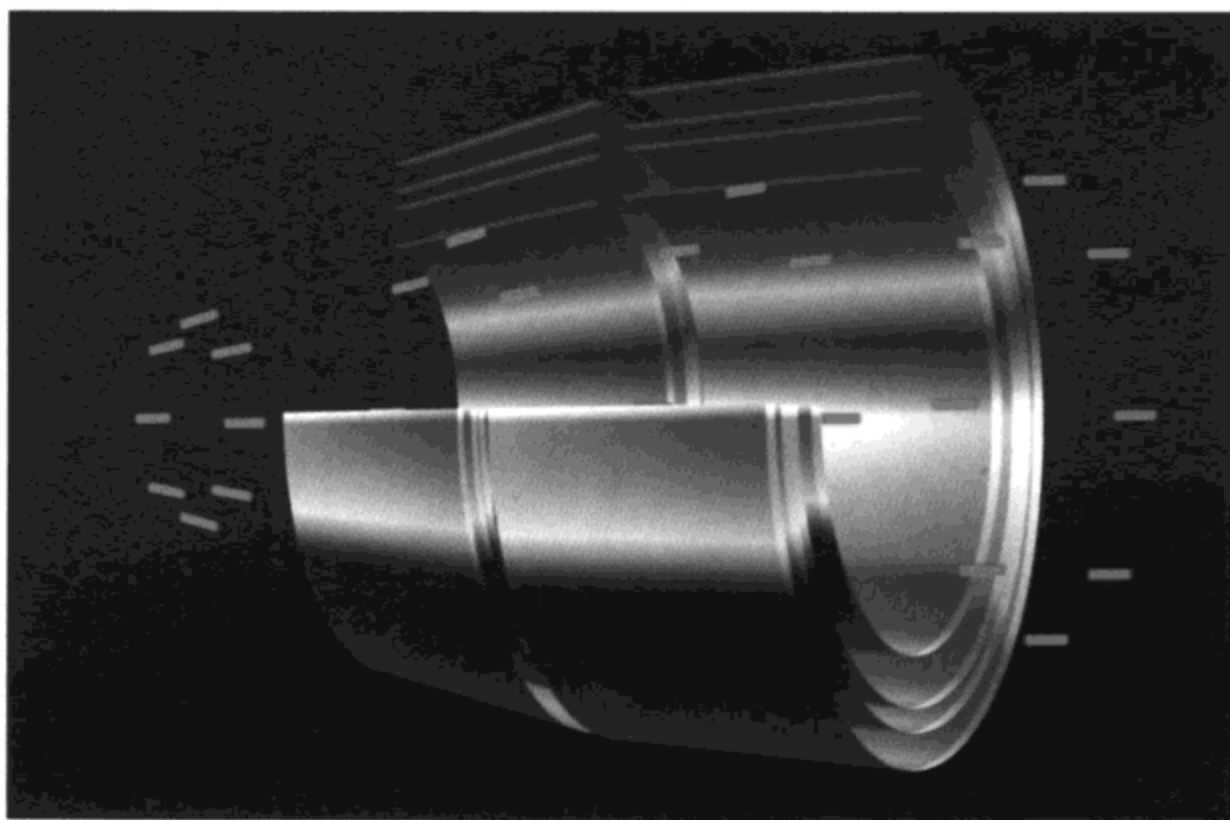
天上的 X 光“千里眼”

X 射线天文学是最近发展起来的新学科, 除了天文学的专业人士之外, 其他人知之甚少。直到在 20 世纪 60 年代早期开拓 X 射线研究工作的天文学家贾库尼⁴²

图 2.14 钱德拉 X 射线天文台是以已故美籍印度天体物理学家苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡 (Subramanyan Chandrasekhar, 但大家都称他为钱德拉) 的名字命名的。它正和欧洲空间局的“XMM-Newton (牛顿)” X 射线太空望远镜 (“XMM” 意为 X 射线多重镜面任务) 一起探测 X 射线宇宙



图 2.15 钱德拉 X 射线望远镜有 4 个圆筒形嵌套镜面，这些镜面将入射的 X 射线汇集到后部的科学仪器上



(Riccardo Giacconi) 获得了 2002 年诺贝尔物理学奖之后，X 射线天文学才广为人知。回顾过去，早期的 X 射线探测器搭载于火箭和气球上，升到大气 X 射线吸收层上空，探测来自天体的 X 射线辐射。此后，很多轨道卫星成为了天文学家在天上的 X 光“千里眼”。而今天最有名的是美国宇航局的钱德拉 X 射线天文台、欧洲空间局的“XMM-Newton（牛顿）”X 射线太空望远镜、意大利与荷兰联合研制的贝坡萨克斯 X 射线卫星（BeppoSax）、日本的“阳光号”（Yohkoh）X 射线太阳观测卫星（2001 年停止使用）和罗希 X 射线时变探测器（Rossi X-ray Timing Explorer, RXTE）。

这些望远镜都对 X 射线（就是我们平常看牙科医生拍片时所用的 X 射线）敏感。在热的星系气体云、爆炸的恒星、耀星、黑洞通常具有的剧烈而极端的条件下，气体被加热到数百万度，就产生 X 射线辐射。

钱德拉 X 射线望远镜在 1999 年 7 月发射到很扁的绕地球椭圆轨道（周期 64 小时）。该望远镜内有 4 组用来汇集入射的 X 射线的嵌套的圆筒形镜面，它们装在钱德拉 X 射线望远镜的锥形长管内。每个优质抛光的镜面的长度均为 83.3 厘米。X 射线进入钱德拉 X 射线望远镜后，以小角度入射这些反射镜镜面，而反射出来的 X 射线信号就汇集到后部的探测器上并被记录下来。

红外的宇宙

哈勃空间望远镜和钱德拉 X 射线天文台是美国宇航局宏大观测计划的一部

图 2.16 空间红外望远镜花费几年时间测绘宇宙的红外图像



分。康普顿 γ 射线天文台是该计划的第三项，它已在 2000 年“退役”，进入地球大气烧毁。美国四大天文观测卫星中最后发射的一颗是空间红外望远镜（Space Infrared Telescope Facility, SIRTf）[译注：现在称为斯必泽（Spitzer）太空望远镜，已于 2003 年 8 月发射]，探测在波长 3~180 微米发射红外辐射的天体。该波段的红外辐射来自恒星（正在）形成区、新近正在形成的行星系、星系中心以及其他被气体-尘埃云遮挡我们视野的区域。这种探测要求将探测器冷却到接近绝对温度零度。空间红外望远镜配有太阳防护板，遮住它的三个特殊冷却的科学仪器，使其免受太阳照射。空间红外望远镜的轨道是“尾随地球的日心轨道”，即躲在地球后面，与地球保持同样的角速度绕太阳公转，这使它的环境温度大大低于一般地心轨道的环境温度。它的“心脏”是一架 0.85 米望远镜，这是至今发射到太空的最大红外望远镜。它的非常灵敏的仪器会向我们展示宇宙的独特景观，让天文学家洞察光学望远镜看不见的太空区域。

随行星探险飞船旅行

虽然天文学家从地面天文台观测行星已经有几个世纪了，但对行星进行实地探险的伟大时代始于 1959 年，那时第一个漫游车探测仪被发送到月球上。从此以后，行星科学家发送很多飞船去探测太阳系天体。太阳、行星、几颗小行星和彗星都有行星探险飞船拜访。



到现在为止，已经有 20 多艘太空飞船和几个登陆器（包括一些取得很好图像的“失踪”飞船）被送往火星。早期发射最成功的是两艘海盗号探测器（各有一对轨道器/登陆器），它们向行星科学家发回它们拍摄的首批高分辨火星图像。接下来成功登陆火星的著名探测器是火星探路者号（Mars Pathfinder），它带去的漫游车名为索杰纳（Sojourner）。近年，登陆火星最成功的有火星探路者号探测器、火星全球勘测者号轨道探测器（Mars Global Surveyor）、火星奥德赛号探测器（Mars Odyssey）。[译注：最新的火星探测器是勇气号（Spirit）和机遇号（Opportunity）。]

为了搜寻火星演化历史的线索，尤其是火星上水的命运，科学家努力测绘它的表面图，测量它的磁场和大气，而最近，科学者正在测绘火星表面的矿物含量图。火星全球勘测者号轨道探测器是装备优良的探测器，它的照相机透镜允许它既可以捕捉到火星表面的广角快照，又可以拍摄到火星表面上小到 1.5 米的物体的像。该探测器还用火星轨道激光测高仪（绰号 MOLA）向火星发射激光束，接收其表面反射回来的光束，通过测量光束的旅行时间就可以算出火星表面各部分的高度。火星全球勘测者号轨道探测器上的热辐射谱仪可以扫描火星表面和大气发出的热辐射，磁力计和电子反射计可以测量火星磁场，从而让研究者推断火星内部的组成。

火星全球勘测者号轨道探测器也计划作为未来火星表面探险的无线电转发站，而它的信号一般用于测量火星大气的变化。迄今，该探测器发回了数千幅火星的照片，足以让人们绘制火星干涸多尘的表面的高分辨全球图。

紧随在火星全球勘测者号轨道探测器后面的是火星奥德赛号探测器，它于 2001 年 10 月进入环绕火星轨道，其使命是测绘组成火星表面的化学元素以及矿物含量和分布图，因此它配备了热辐射成像系统（THEMIS）和 γ 射线谱仪（GRS）。与很多别的火星探测计划一样，人们希望通过火星奥德赛号探测器发现更多有关火星上是否有水的情况。2002 年，火星奥德赛号探测器的传感器检测到火星南极附近一个区域表面的 1 米表土有水冰迹象。科学家把这一发现描述为“一层脏冰”。这是由于探测到氢原子而推断存在水，在这种情况下，氢就代表水。水是人们在未来进行火星探险时考虑的一个重要因素。同时，火星奥德赛号探测器还装备有研究太阳风和宇宙线对火星辐射程度的实验仪器。

行星探测器也成功地拜访了外太阳系。木星世界的第一批拜访者是先驱者号（Pioneer）探测器，它于 20 世纪 70 年代中期飞越木星上空。紧随其后的是 2 艘

图 2.17（上页）自 1997 年以来，火星全球勘测者号轨道探测器在绕火星的轨道上运行，继续送回火星表面的图像

旅行者号 (Voyager) 探测器。从 20 世纪 70 年代后期一直到 80 年代后期，旅行者 1 号探测器和旅行者 2 号探测器先后拜访了木星和土星，而旅行者 2 号探测器又继续拜访了天王星和海王星。所有这些探测器正在飞出太阳系的路上，但它们任务完成得非常出色——它们用携带的仪器，包括照相机、光谱仪、偏振光度计（测量光的强度和偏振的探测器）以及其他传感器，让我们第一次亲自感受与这些气体巨行星的近距离相会。

伽利略号木星探测器进行了人类有史以来对木星最长时间的探测。它装有多种传感器，可以探测这颗巨行星严酷环境（从它的磁层辐射带到最高的云层）的几乎各个方面的情况。2003 年 9 月，伽利略号木星探测器完成了它的使命，闯入木星的浓厚云层内坠毁。人们通过旅行者号探测器已经对木星有所了解，而伽利略号木星探测器 8 年的工作使人们对木星的认知又更加深入。伽利略号木星探测器取得了很多人惊异的成就，包括绘制火山卫星——“木卫一”的全球图像、探测器进入木星云层、发现了“木卫三”自身的磁场等。伽利略号木星探测器也发现了有力证据，证明冰卫星“木卫二”的表层“骑”在融化盐水的海洋上面，而“木卫三”和“木卫四”也有液态水层。

自从旅行者号探测器首次拜访有美丽光环的土星，20 多年已经过去了。从那时以来，天文学家们就不得不限于在地球上观测土星和用哈勃空间望远镜进行远距离拍照。美国宇航局和欧洲空间局联合发射的卡西尼号 (Cassini) 飞船经漫长旅途，已于 2004 年 7 月到达土星。它载有一组照相机和遥感仪器，发回了土星的多波段景观图像，等待科学家研究。它能够测量土星的磁场和辐射环境的性质，且“嗅查出”在环绕土星轨道上的和土星光环中的尘埃颗粒。进入环绕土星的轨道后，卡西尼号飞船释放惠更斯号 (Huygens) 探测器到土星的最大卫星——“土卫六”的浓厚云层中。在降落过程中，惠更斯号探测器测量了“土卫六”的大气，将其云层和表面的图像和数据发送回地球。现在，卡西尼号飞船已经飞越了木星，到达了太阳系外层空间，将对土星进行令人激动的观测（译注：2004 年 12 月 24 日，惠更斯号探测器与卡西尼号飞船分离；2005 年 1 月 14 日，惠更斯号探测器成功登陆“土卫六”）。

经过长时间准备，太阳系大家庭中的小成员——彗星和小行星也正成为科学家们的探测重点。星尘 (Stardust) 号彗星探测器是新千年首批彗星探测器之一。2002 年 1 月，它已经近距飞越小行星安尼弗兰克 (Annefrank)，并于 2004 年 1 月与威尔德 2 号彗星 (Wild 2) 实现了历史性的“亲密接触”。星尘号彗星探测器的主要目的是收集彗尾的尘埃样品。

尽管彗星在其轨道运动过程中一路抛洒它的尘埃，收集彗星尘却不是很容易



图 2.18 伽利略号木星探测器历经 8 年，测绘了木星的大气、环系和卫星的图像后，穿进木星云层坠毁

的任务。为了捕捉到一点彗星尘，科学家必须保证捕获到的微小彗星尘既不被损伤，也不被破解。他们发现了气凝胶——一种有海绵状、多孔结构的硅基物质。一块气凝胶看起来像固结的蓝色烟雾，并有极其多的间隙，快速运动的尘粒一下子就穿入气凝胶，气凝胶吸收尘粒的能量并把尘粒包裹保护起来。星尘号彗星探测器装备有一个填充气凝胶的盘子，可以捕获数以百万计的尘粒。在 2006 年星尘号彗星探测器结束任务时，尘粒样品返回舱会在降落伞的帮助下安全地返回地球 [译注：最近已带回到地球上]，等待彗星学者实验研究。

观测者们都是谁

美国有 1.1 万多专业天文学家在维护和使用着世界上的大型望远镜设备。美国天文学家委员会由几十位专家组成，他们来自太阳物理学、行星科学、恒星研究、高能物理学、宇宙学和其他学科（如地球物理学和天体生物学）领域。在几乎所有的情况下，有关天文的研究项目由政府机构提供经费，由大学和研究所实施，并且长期定向地雇用一批酷爱天文的人士。

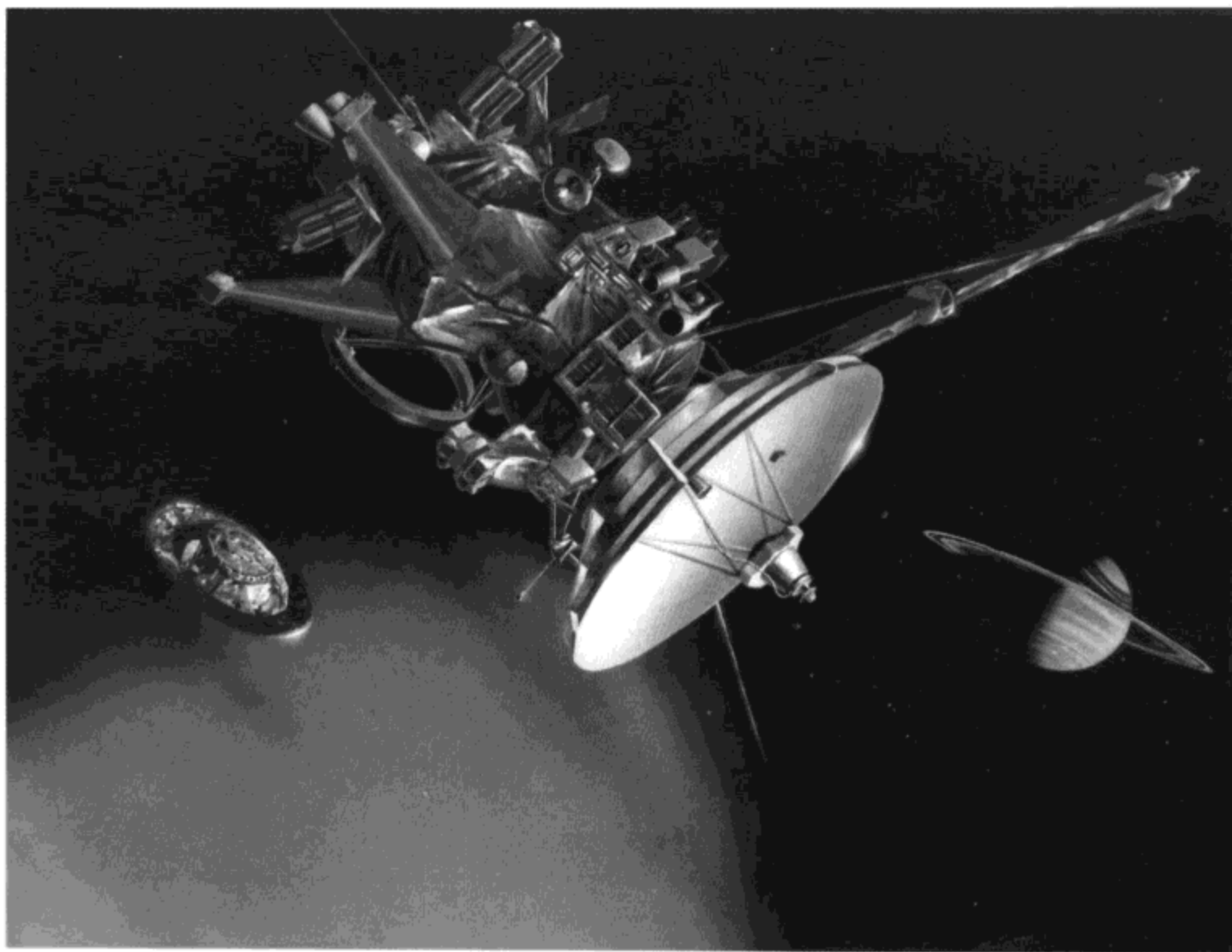


图 2.19 卡西尼号飞船的使命是探测土星，已升空上路，于 2004 到达。它的目的是探测土星的光环和卫星，并发射子探测器——惠更斯号探测器（图中左偏下），使其成功登陆“土卫六”。卡西尼号飞船在飞越木星的途中已向地球发送了图像和数据

很多业余天文爱好者也单独地和成组地观测星空。他们使用各种各样的设备，从简单的庭院望远镜到完全可以跟某些大学设备媲美的复杂设备。据最可靠的估计，在美国有 25 万多名业余天文爱好者，或许还有更多的爱好者遍布全世界。众多的爱好者拥有自己的望远镜，经常简单地观测恒星、行星和星系。这些观星人有不同职业，由于他们对恒星、行星和星系的爱好而走到了一起。作为嗜好、娱乐、玩赏或者随你怎样称谓，业余天文爱好者的观测又唤起了人们对星空的欣赏和好奇之心，将我们引向广袤的宇宙。

天文学本身就是在世界范围内具有普遍魅力的学科，19 世纪后期，业余的天文爱好者和专业的天文学家就形成了公共社团（虽然规模很小）。随着天文学的重要性不断增长和天文台的费用超过了大多数个人的承受能力，专业的天文
48 学家和业余的天文爱好者之间因为有了差别而分隔成不同的群体。由于分隔的过程并非都很愉快，因此其结果是很不幸的，因为它伤害了重要的、共同传承

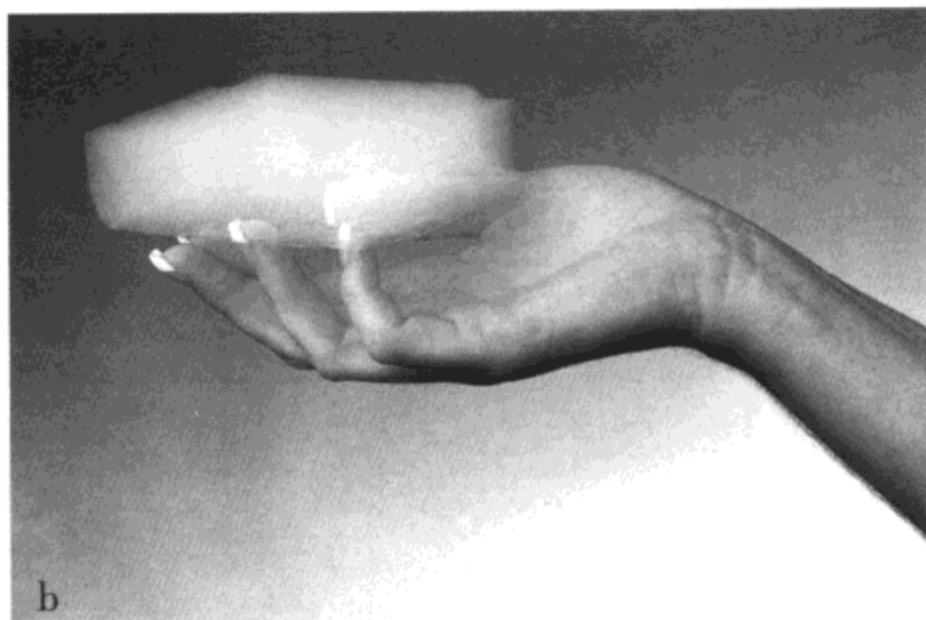
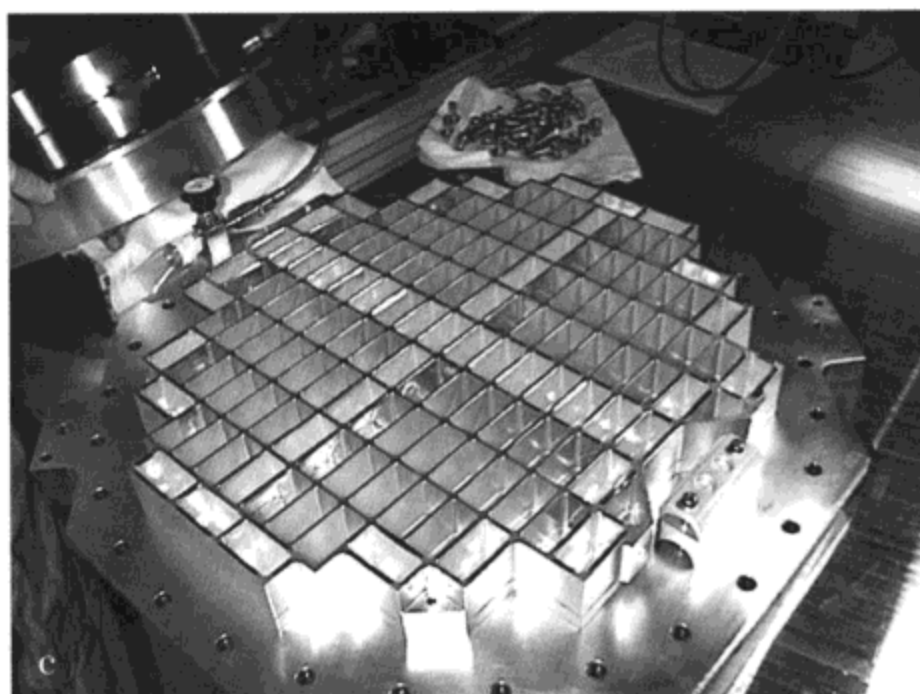


图 2.20 星尘号彗星探测器升空上路 (图 a)，去捕获彗星绕太阳公转时抛洒的尘埃。一块气凝胶轻飘飘的 (图 b)，但它可以安全地吸收尘粒并将其保存在收集盘中带回地球 (图 c)



的各方。

现在，这种分隔正在慢慢结束。很多优秀的业余天文爱好者与数量正在增多的专业天文学家协作，对科学进步做出了重要贡献，显示了合作的力量和价值。近几十年来，诸如月球和行星观测者协会 (ALPO)、美国变星观测者协会 (AAVSO)、国际哈雷 (彗星) 观测协会 (IHW)、尤利西斯 (Ulysses) 彗星观测 (UCW) 协会、院庭天体物理中心 (家庭观测者协会)、国际流星组织、国际火星观测协会、国际木星观测协会等很多协会都与专业天文学的对口机构共享所需的很多观测资料。

毫无疑问，21 世纪的天文学家将取得更令人瞩目的宇宙观测研究成果。现今的天文台和太空探测器真正地拓展了我们的宇宙视野，而这是一个世纪前即使最具有前瞻眼光的天文学家也想象不到的。本书后面各章的图片，凝聚了几代穷其一生探索宇宙真相的天文学家的聪明才智和毕生心血。

我们的行星系 家族

我突然看到一粒美丽的、蓝色的小豌豆，那是地球。我举起我的拇指，闭上一只眼睛，而我的拇指遮住了整个地球。我不觉得自己像一个巨人，相反，我觉得自己非常、非常渺小。

——阿姆斯特朗 (Neil Armstrong, 阿波罗登月计划宇航员)

哎呀，给我们的礼物可真多啊，就像别人看我们那样来看自己！

——伯恩斯 (Robert Burns, 《致一只小动物》)

天文学的探索永无止境，任何时候我们都不应骄傲自满，因为每一项天文学的新发现都在提醒我们：我们在宇宙中的地位真是渺小！我们应当十分清醒地认识到：如果将宇宙比做一张图片的话，那么太阳系只是图片上小小的一块，而我们的地球和地球上的每样东西甚至比这张图片上的一个像素还要小。但正是在这不到一个“像素”的地球上，世世代代的人们生生不息。

是的，因为相对宇宙来说我们过于渺小，要想探索整个宇宙，首先必须了解我们的家园——地球。就在不久以前，人们对于地球在宇宙中地位的了解还存在相当的缺陷。直到我们研究太阳系的能力得到提高，我们的观点才有所改善。在20世纪，特别是在后50年，对太阳系的大量研究不仅改变了我们对其他行星的了解，而且也改变了我们对自己的地球家园的了解。于是，现在我们可以高谈阔论有关火星大气中二氧化碳的季节性变化、木卫一上的火山活动、木卫二冰冻表面下的泥水海洋，或者对遥远的天王星卫星的表面特征和地球上的冰谷进行比较。我们把哈勃空间望远镜对准木星和土星，追踪它们高纬的极光；把X射线望远镜对向彗星，了解这种“脏雪球”怎样成为这样高能辐射的源。科学家满怀信心地计划着耗资数百万美元的探测项目：研究土卫六的浓云笼罩下的表面，或冥王星的定常坍缩着的大气。那些拥有优良设备的业余天文爱好者记载下所观测到

图 3.1 从一艘漫游在太阳系边缘的飞船上，我们会看到什么？这些“太空斑点”是旅行者 1 号探测器从约 64 亿千米远看到的太阳和地球。太阳似乎像别的恒星那样，而太阳的光辉模糊了在其公转轨道上绕转的微弱斑点——地球。在旅行者 1 号探测器的“眼”中，地球（小图）只不过是小的蓝色斑点

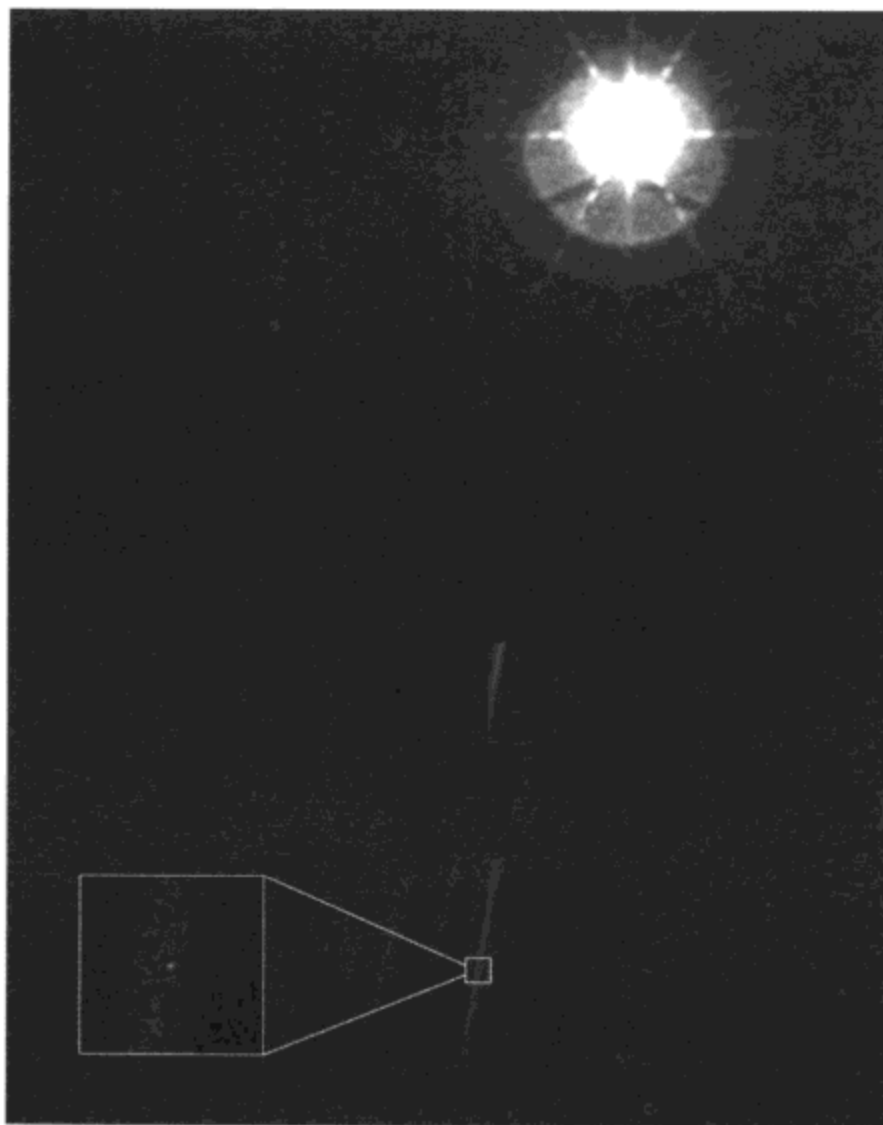
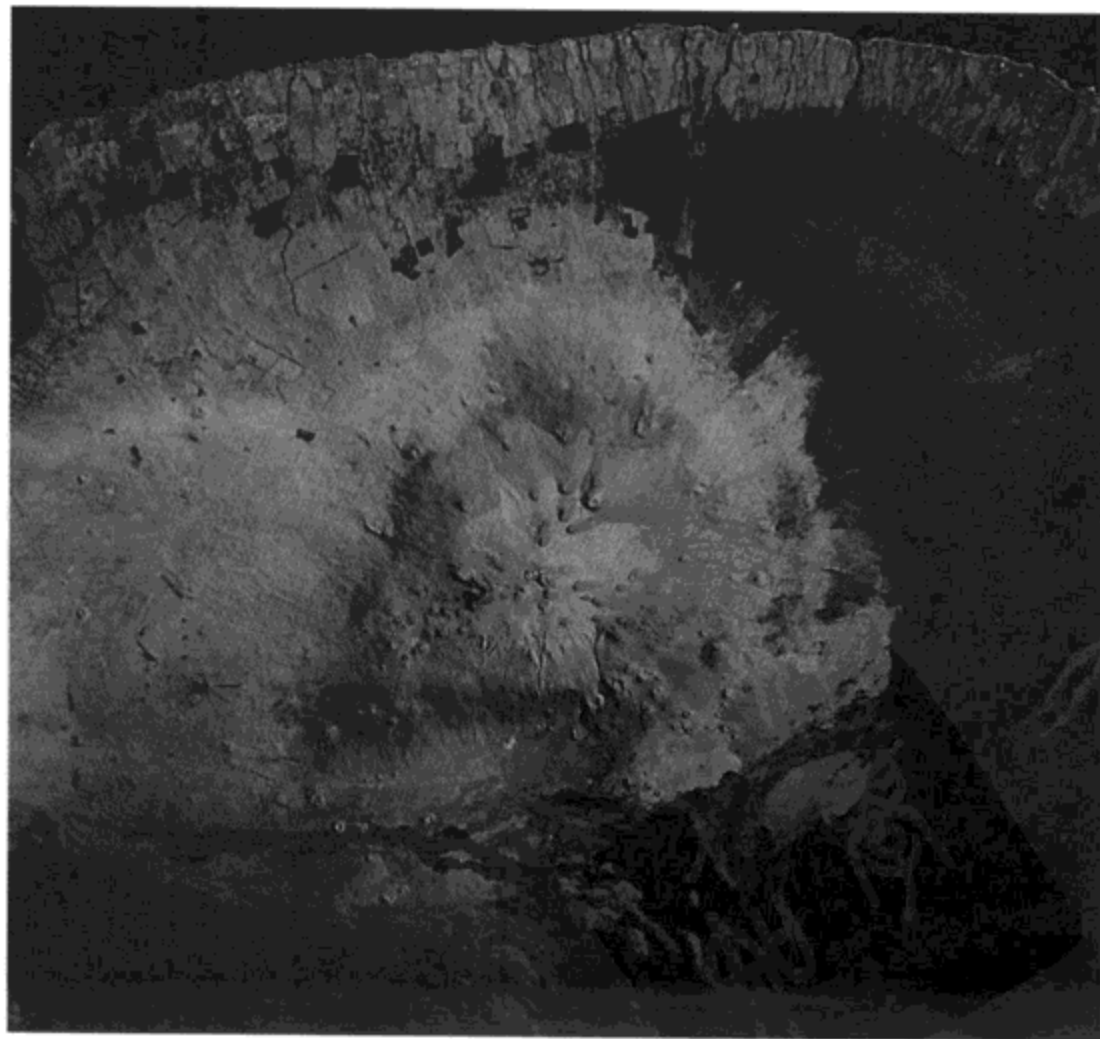


图 3.2 从绕地球的低轨道上几乎看不清夏威夷莫纳基亚山上的天文台群（我们观测星空的一些威力最强的“千里眼”就设在这些天文台里）。你能够在这幅图片的中心识别出天文台的那些圆顶吗？



的火星表面闪亮，追踪木星的风暴，定时扫描星空以搜寻比冥王星暗的小行星。

变化着的太阳系

太阳系处于经常变化的状态，每颗行星、卫星、小行星、彗星甚至太阳本身都在经受多种改造过程。是什么力量在改造行星并让众多行星观测者忙碌？在行星的图片上，我们最容易发现的是陨击成坑、火山活动和大气变化，其证据可以在地球的卫星——月球、木星的大红斑、火山卫星——木卫一、彗尾被约束的形状和行星的磁层找到。此外，在近几十年来，人们把对太阳系天体的运动（它们的轨道动力学）的研究与对太阳系（小于行星的）小天体的行迹的观测结合起来。这样一来，我们全都意识到了那些迷路而穿越地球轨道的彗星和小行星可能对地球造成的碰击威胁，因而心生恐惧。1994年，各国天文学家都对苏梅克-利维9（Shoemaker-Levy 9）号彗星撞入木星云层进行努力研究，这一事实提醒我们要谨防小行星和彗星撞击地球的潜在危险。我们对太阳系形成早期遗留下来的天体的了解越来越深入，各国科学家因此联合起来搜寻可能撞击地球的天体。

远在地球上存在任何生命之前，太阳系已发生了大规模演化。故事发生在45亿年前，地点是混合了（大质量恒星死亡——所谓超新星抛出的）重元素的氢气云。冲击波（激波）猛烈作用于云物质，不断压缩，形成一个原始星云。连续的压缩加热了星云并使它开始旋转。旋转运动使得星云变扁，而引力作用使物质团聚在一起。较大的团块吸积越来越多的物质，中心的团块变成原太阳。在星云的其他地方，尘埃颗粒聚集而形成星子，星子相互碰撞和结合而形成原始行星。

在一定的時候，原太阳的中心区变得足够热和密集，氢原子核猛撞到一起而燃烧（结合）为氦原子核——典型的（原子）核反应。这个热的年轻天体（原太阳）就成为一颗恒星。猛烈地发光标志它幼年的到来，散发的辐射喷流就像宣告新生命到来的宇宙烟火。新生太阳射出的太阳风破坏了附近残留的气体和尘埃（这些气体和尘埃曾经是新生太阳产生的摇篮），留下4个岩石天体，这4个岩石天体最后成为无大气的水星、富大气的金星、孕育生命的地球、谜一般的火星。更大的行星具有较大质量和引力，可以保存并使一些原始氢成为其大气，它们成为木星、土星、天王星和海王星。在太阳系最远的寒冷边区，由于受新生太阳的热呼吸作用小，原始星云的一些最冷团块得以幸存下来，成为冰体世界，这就是我们现在知道的柯伊伯带（Kuiper Belt）——包括太阳系的最大成员冥王星及其卫星查伦（Charon，冥卫一）。

虽然原始太阳星云的绝大部分物质已形成了新生的行星，但仍有相当多的遗

留物，它们形成了现在居留在太阳系的较小天体：彗星、小行星和在环绕行星轨道上的卫星。因此，从某种意义上说，这些较小天体是太阳系早期形成的“剩余物仓库”，只是我们最近才认识到这一点。

这个关于太阳系形成的理论并不完善，它留下关于原始星云的起源和太阳系天体形成用了多久等很多未解答的问题。这一理论没有完全解释为什么在火星和木星的轨道之间存在小行星带的问题（虽然我们推测是木星的巨大引力妨碍了在小行星带那里形成一颗大行星）。关于在太阳系外缘绕轨道运行的冰天体，我们对其大小和范围也知之甚少。然而，这一理论提示了我们所观测的恒星和行星的形成过程，这是解释我们所见的很多星空天体的重要的第一步。

撞击和其他灾难

大行星之所以存在，是因为众多较小天体结合到一起才成为一个较大天体。我们考虑这个问题的另一种方式是：我们是因为撞击而继续存在，一个天体撞入别的天体是太阳系生存的一种方式。由于地球有大气层的保护，使人类免受外来小岩石块的袭击，因此人类忽视了宇宙中仍在发生撞击。1993年，一条惊人的消息——木星将在1994年夏季被苏梅克-利维9号彗星撞击——惊醒了人类。撞击并不是一个新概念，撞击的证据遍布太阳系。当然，这次撞击事件是第一次可以用地球上的各种望远镜几乎在“黄金时间”内观测到的。科学家们联合起来，使用世界各地的天文台加上多种太空仪器，在可见光、紫外和红外波段捕获这次撞击的图片和资料。地球上没有一个人真正看到苏梅克-利维9号彗星的碎块闯进木星大气层，因为所有的撞击发生在木星背向地球的那一侧。但是，由于木星



图 3.3 苏梅克-利维9号彗星在1992年飞近木星。木星的强引力场把它的彗核撕为21块，并改变了它们的轨道，导致它们在1994年7月先后撞击木星

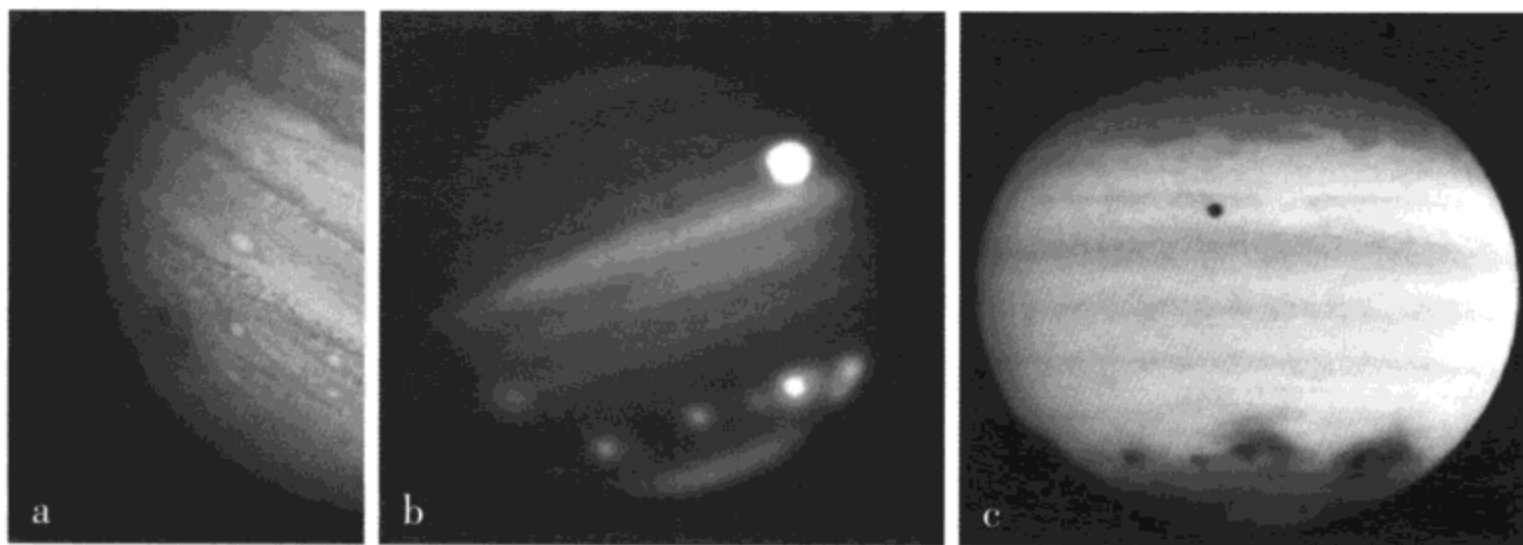


图 3.4 用可见光、红外和紫外滤光片拍摄的彗星在木星上的撞击“伤疤”。大的 G 碎块在木星上留下显著的（可见光）伤疤（图 a），几天才耗散。每次撞击都产生热斑（图 b），在红外波段可以看见。紫外像显示了几次撞击的后果（图 c），它们似乎是暗的，因为撞击把尘埃抛到大气中而遮住了紫外辐射

苏梅克-利维 9 号彗星撞击木星事件引起了人类对天体撞击后果的密切关注，尤其是撞击对人类聚居的地球造成的后果。真的，地球和太阳系其他天体自形成以来已遭受多次撞击。40 多亿年以前，大约太阳诞生后的 10 亿年，内太阳系的天体经历了所谓的“（形成）晚期严重轰击”（Late Heavy Bombardment）。这是原始星云的残留物的最后一次大规模“陨石雨”，但这并不意味着太阳系诞生时形成的碎块就没有了。每年，太阳蒸发那些偶然飞得很近的彗星。很多彗星（原始太阳星云的冻结残留物）与太阳的这类偶遇都可以通过诸如太阳和太阳风层天文台（SOHO）等太空观测器实时观测到。这种彗星撞毁于太阳的事情是频繁发生的，证实了太阳系仍存在数目众多的彗星和小行星。受太阳的引力吸引，这样的彗星就像飞蛾扑火一样撞毁在太阳上，其中有些彗星是来自太阳系的最边缘。

这些彗星的殉难对太阳没有任何明显的影响，但是，假如同一颗彗星（或者是小一点的小行星）或者某些别的太阳系天体与地球轨道交叉，那么它们撞击地球的后果就会大不一样了。在地质时期，地球表面已屡遭撞击，只是很多撞击遗迹被无情地风化、剥蚀或被火山过程破坏掉了。现在，在地球表面至少存有 148 个可识别的撞击遗址（陨击坑）。有些陨击坑已经剥蚀，或者被植被覆盖，而有几个陨击坑十分明显，如美国亚利桑那州的 5 万年前形成的陨击坑。最近一次的撞击事件于 1908 年在西伯利亚的通古斯地区发生，这可能是一颗小行星在撞击地面之前发生低空爆炸。在该地区所拍摄的照片显示，此次爆炸毁坏了大片森林（译注：1600 平方千米），目击者在发生爆炸前看到天空突然飞来一个明亮的大火球。

地球上最著名的撞击事件发生在 6500 万年前，即白垩纪和第三纪之交，其危害是灾难性的。十多年前，人们终于找到了这次撞击产生的陨击坑，它在墨西

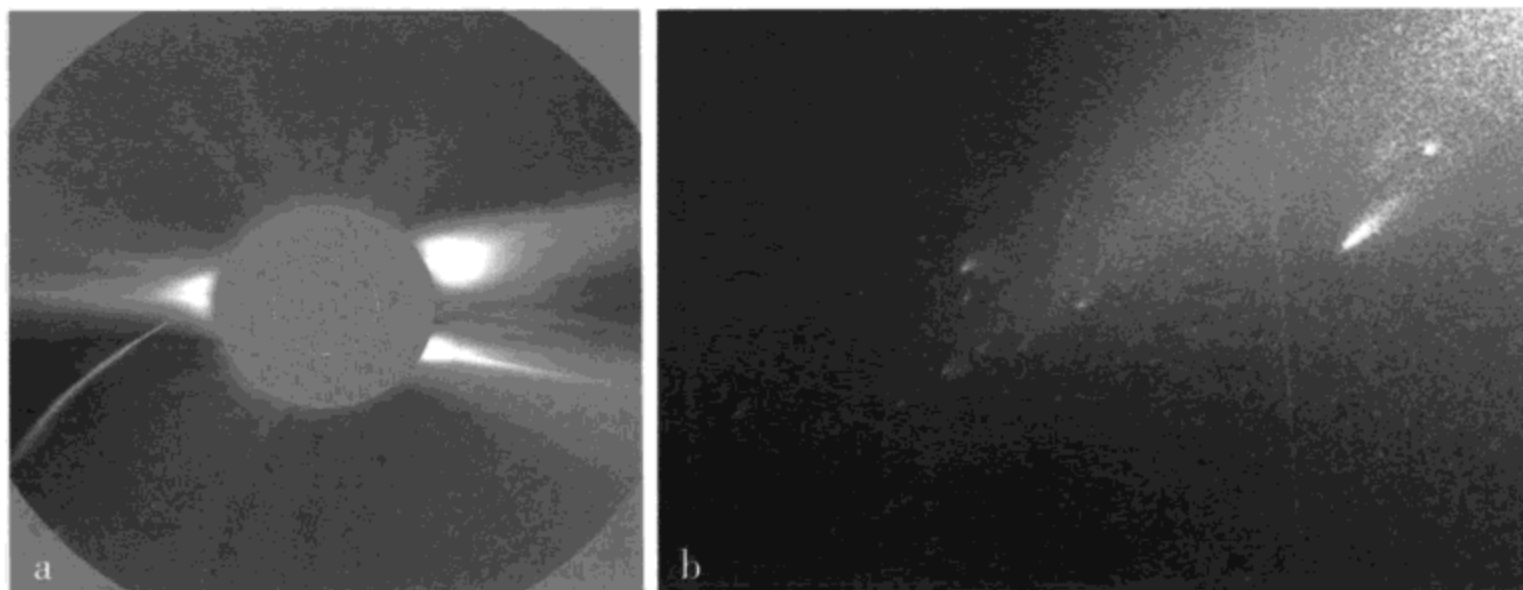
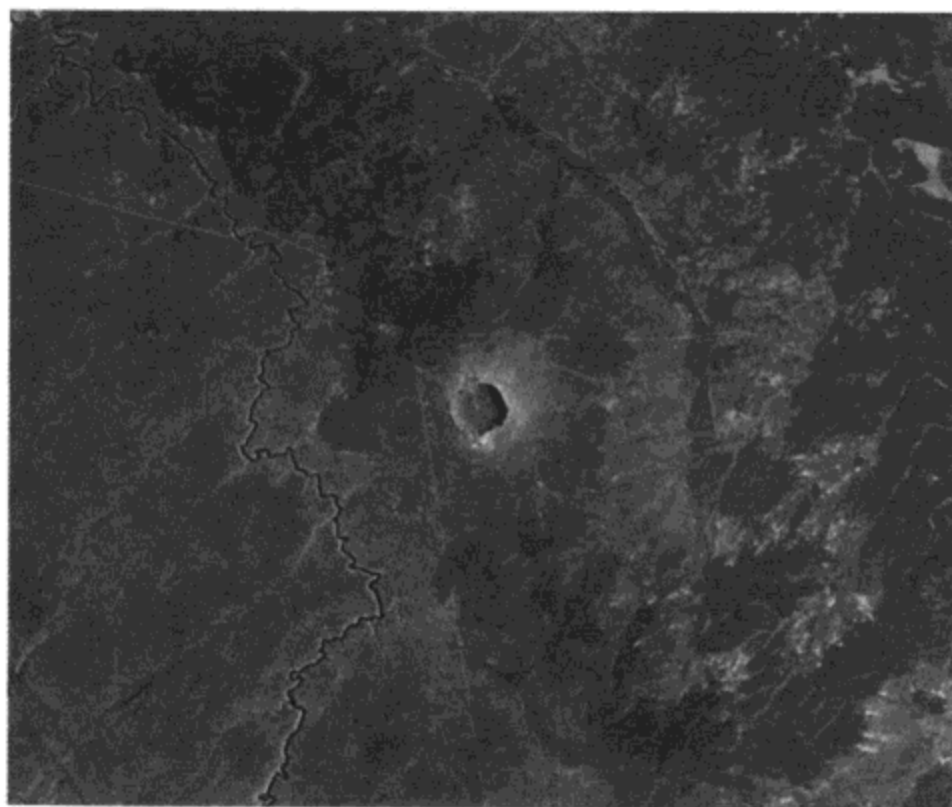


图 3.5 掠日彗星的命运。图 a 是 1996 年 12 月 23 日，在彗星 SOHO-6（掠日彗星之一）接近太阳时，太阳和太阳风层天文台的日冕仪抓拍到的照片。我们看到，彗星 SOHO-6 的尘埃彗尾从彗核流出来。最终，彗星 SOHO-6 被太阳的热量蒸发。太阳和太阳风层天文台已经发现了 500 多颗彗星 [译注：现已达 1000 多颗]。由于很多原因，彗星破碎，冰和碎块沿它们先前的轨道散布。在 2000 年 7 月 26 日左右，丽妮儿 (Linear) 彗星 (C/1999 S4) 破碎为很多碎块，哈勃空间望远镜随即对其进行跟踪拍摄。图 b 为哈勃空间望远镜拍到的照片，这是人类第一次近距离观测彗星子——彗核的组成部分。母彗核碎裂为一群小碎块，最亮的碎块可能成为残留的母彗核

哥尤卡坦半岛的希克苏鲁伯 (Chicxulub，当地玛雅语是“魔鬼尾巴”的意思) 附近，直径 200 多千米，已深埋于半岛下面，延展到海湾下。这次事件造成一系列全球性灾难，使得以恐龙为代表的大量物种灭绝——称为“恐龙灭绝”。如果现在发生类似的撞击，就会再次严重地中断地球上的生命。联想到苏梅克-利维 9 号彗星撞击木星的灾难性后果，天文学家们把搜寻近地天体 (NEOs) 作为新的紧急任务就毫不奇怪了。

自苏梅克-利维 9 号彗星撞击木星事件以来，小行星接近地球的新闻马上会引起公众的关心。要探测这些可能撞击地球的天体，就必须做大量扎实艰辛的工作：进行大量的精确观测，以便算准可能的撞击体的轨道和预报其未来动向。这很需要时间，而且过程也很复杂，因为某些近地天体太暗，直到相当接近时我们才能看到。为了监测星空中可能的近地天体，科学家们成立了很多研究机构，包括亚细亚哥 DLR 小行星巡天 (ADAS) 计划小组和保卫太空基金会 (两者都在意大利)、亚利桑那大学卡塔琳娜巡天计划小组、日本的保卫太空协会、林肯近地小行星研究计划 (LINEAR) 小组、罗威尔天文台近地天体搜寻 (LONEOS) 计划小组、近地小行星追踪计划小组 (NEAT，由美国宇航局喷气推进实验室管理)、亚利桑那大学月球和行星实验室的太空监测计划小组，等等。在作者撰写本书时，美国宇航局指示，要搜寻直径大于 1 千米、与地球轨道交叉的所有彗星和小行星中的 90%。

图 3.6 航天飞机上的宇航员看到的地球最著名的陨击坑——美国北亚利桑那州巴林杰 (Barringer Meteor) 陨击坑。它是由于在约 5 万年前, 一个约 60 米大的太空碎块撞击地球而形成的。此次撞击开掘 17500 万吨岩石, 形成了一个直径约 1 英里 (1.6 千米)、深 600 英尺 (约 180 米) 的大坑。如果说这是由于一个较小的太空碎块撞击地球而形成的话, 那么, 设想一下, 若是较大的小行星撞击地球会产生多么大的危害! 由于巴林杰陨击坑所在的沙漠地区没有大规模雨水和洪水侵蚀, 因此保持得很好。在气候潮湿的区域, 陨击坑很快就会销蚀, 而人们一般很难察觉到发生在海洋上的撞击 (除非撞击特别猛烈而引起海啸)



在动态的太阳系中生存, 撞击就是生活的一部分, 这种危险在太阳系形成时就已注定。然而, 说起来可能有点令人难以置信, 天文学家不断地监测星空那些可能在夜间撞击地球的天体, 就可以有助于保卫地球。这样的连续警戒可以帮助我们识别威胁, 在发现入侵的撞击体时预先报警。下面简单介绍他们是如何工作的。当发现一颗新的小行星或彗星飞入近地空间时, 业余天文组织和专业天文组织

56 组织的观测者们会马上测定该天体的轨道, 预报该天体在未来几个月或几十天的位置, 这可能不够准确, 但可以通过做大量的位置测量和分析而改进预报精度。幸运的是, 观测者们很快预测到大多数天体将从地球近旁飞越过去。但是, 总有几颗不能确定其准确位置, 如果初步观测表明该天体有撞击地球的可能性, 天文学家就会对威胁进行评估并向公众报警。

发现威胁后, 就必须想办法解决。你脑子里可能马上想到好莱坞式电影里的情节——发射携带炸弹的航天飞机攻击来袭天体, 使其偏离原来的轨道。现实的方法可能没有这么富有戏剧性, 必须更科学、更精确。如果天文学家能够尽快而精确地测定来袭天体的轨道, 那么, 在理论上, 可以早在它撞击地球之前就发射装备了推进器的小探测器, 去拦截该天体, 把它推离可能撞击地球的轨道。

59 对于近地天体, 人们更加关注的一个结果是预报级别, 即天文学家评估一个特定天体可能造成的危害程度。天文学家在意大利的都灵会议审定出“都灵级别”, 它把一个天体撞击地球的可能性及危害程度评估为 0~10 级, 其中 0 级表示一个天体没有或很少有机会撞击地球 (0 级也用于陨落天体很小而烧毁在高层地球大气), 10 级则表示肯定会发生撞击且陨落体的撞击会造成全球性灾难。

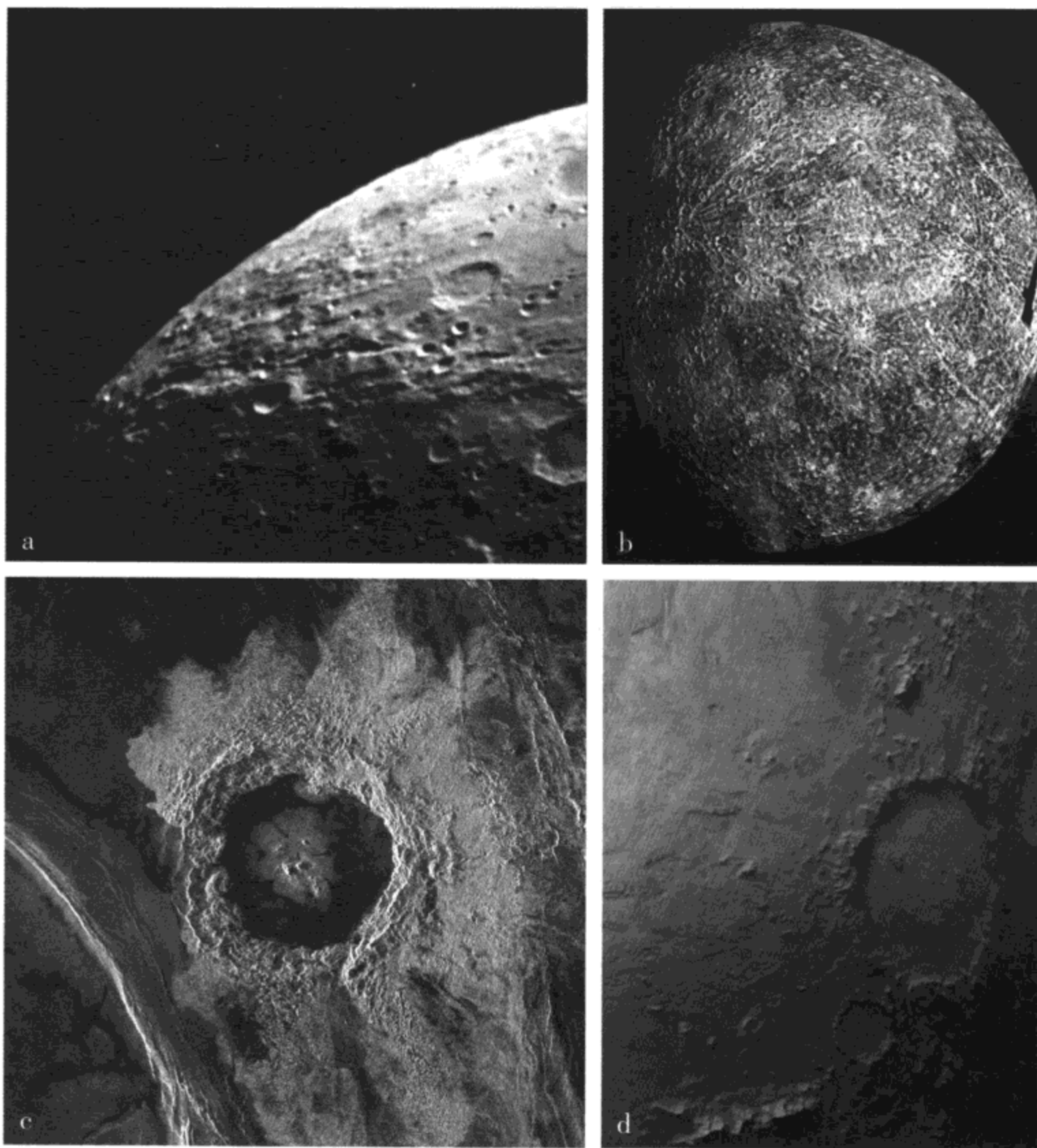


图 3.7 内太阳系的大多数岩石天体上都有很多陨击坑。克莱门汀 (Clementine) 号探测器拍摄的月球表面图片显示，大的陨击盆地上散布着较小的陨击坑 (图 a)。水手 10 号探测器拍摄的水星，其表面古老而布满陨击坑疤痕 (图 b)。金星表面也受过撞击。虽然它的浓密大气层使较小撞击体在穿越过程中燃毁，但大陨石仍会撞击其表面、开掘陨击坑。图 c 是麦哲伦号金星探测器探测到的雷达图片，其中央是直径 69 千米的迪金森 (Dickinson) 坑，周围是撞击期间抛出的熔融物质。火星表面有多种形状和不同大小的陨击坑。加勒 (Galle) 坑 (图 d 的中央) 颇似一张“快活脸”，撞击抛出物在加勒坑周围产生次生小坑和沉积层

太阳系的其他星球显然都曾发生过撞击事件。我们几乎到处——至少在这些星球的固体表面找到了很多陨击坑。撞击气体巨行星的证据不太明显，或者这些证据很快地被大气变化抹去，就像苏梅克-利维 9 彗星撞击木星的伤疤很快消失那样。然而，就在我们的近邻——月球上，有大量的陨击坑。如果你想观看月球



图 3.8 苏梅克“近地小行星会合”探测器跟踪拍摄小行星爱神星（上左）。很多砾石散落在一个陨击坑底（上右）和广布各处表面（中、下左、下右）。爱神星表面散布着陨击坑和称为表土的尘粉物质。这些都是伪彩图像，用以表明表面物质的年龄和新鲜度

上的陨击坑，用一架双筒望远镜去观察月球表面就可以做到。科学家们之所以努力去了解撞击或陨击的过程，主要是因为当初想确定月球上的坑穴是火山坑还是外来天体撞击形成的陨击坑。现在看来，两种答案都有道理 [译注：如果只是看照片，火山坑和陨击坑的形貌是相似的，不能断定是哪种坑，还需要其他地质证据（例如是否有外来天体的成分）来鉴别]。

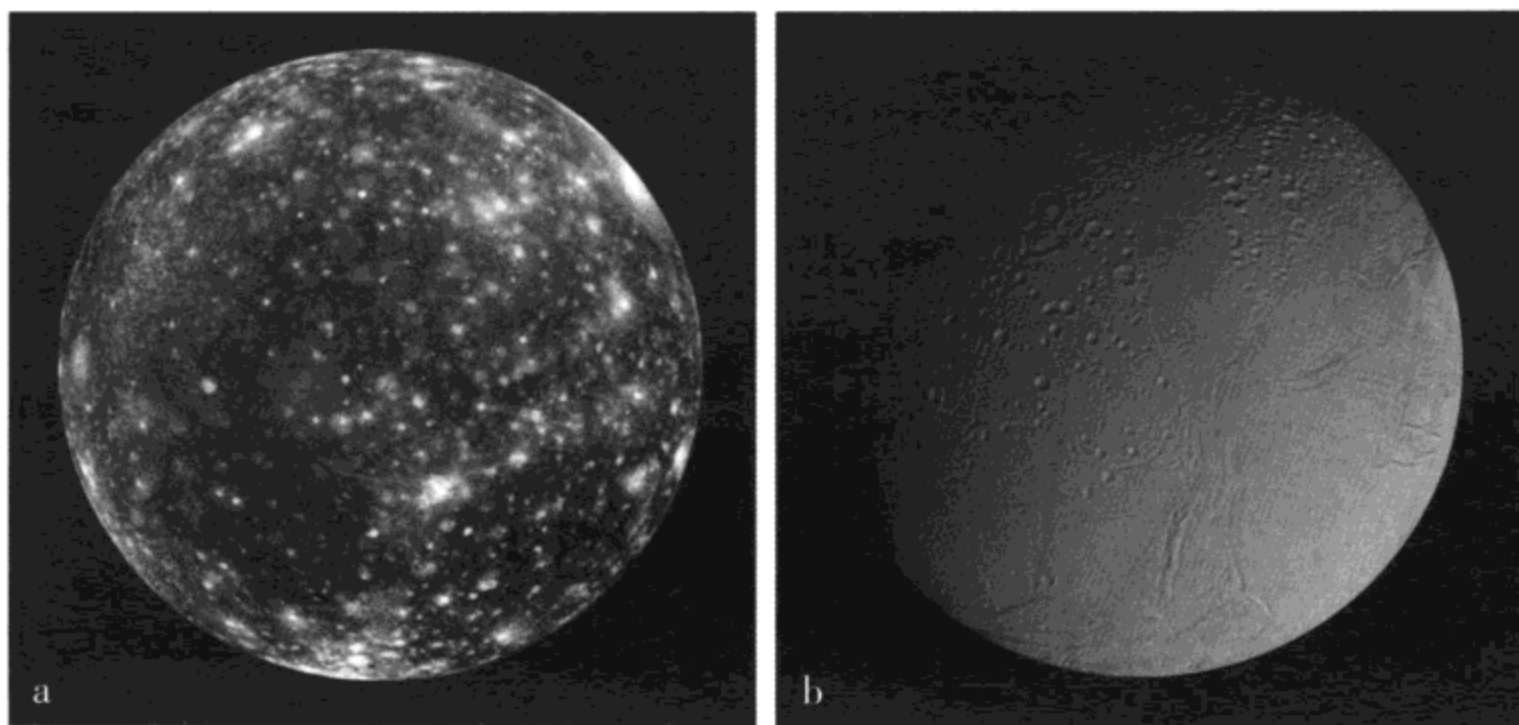


图 3.9 外行星的大多数冰卫星上散布陨击坑。木星的一颗冰卫星——木卫四的表面古老而布满陨击坑（图 a）。土星的一颗冰卫星——土卫二上，严重陨击的较老地形毗邻较新的已改造地貌（图 b）

当一个外来天体撞击一颗行星或卫星的表面时，就有巨大能量的转变。由于涉及很大的轨道速度，一个子弹般大小的天体的撞击能量也会达到高级来复枪发射能量的千倍。这样的撞击能量可以蒸发和融化撞击体以及撞击点周围的表面物质，从而形成我们所熟悉的坑穴。同时，从撞击点会抛出大量的像雨一样的“溅射物”，虽然在某些情况下这些溅射物被抛到外空，但一般会散落到撞击点周围而形成覆盖层。融化物质在撞击点周围流动。在月球盆地（称为“月海”），月球表面之下的熔岩通过坑底喷出。盆地被山脉环围绕着，而后被坑底流出的熔岩填充。在太阳系外区的冰卫星上，撞击后流出的“岩浆”更像是软化了的冰甚至泥水-冰混合物。后来的撞击在老陨击坑顶部击出新的陨击坑。在太阳系，一些最古老的星球表面伤痕累累，布满了陨击坑，而另一些星球上则经历了火山活动、风和气候作用或流水作用的改造。

天外来客

就撞击所造成的危害程度而言，落在地球上的陨石算不上什么，它们很难与那些在其他星球形成最大陨击坑的大撞击体相提并论。然而，这些陨落到地球上的太阳系小碎块常告诉我们它们自身的有趣故事。每年，有数千块太空岩石落到地球上，但仅在它们陨落处凿出小坑。大多数陨石跟任何已知行星体没有关系，但少数罕见的陨石似乎来自火星甚至小行星灶神星。

最初，人们甚为疑虑：其他行星的岩石通过怎样的途径到达地球？要了解这

是怎样发生的，我们还要说到撞击在太阳系中的另一种效应：作为一种转移机制！数百万年以前，一颗流星体撞击红色行星（火星）的表面，在撞击过程中抛出很多火星岩石。毫无疑问，大部分岩石又落回火星表面，但有少数像火箭一样飞到太空。它们在太空游荡了数百万年，最终与地球轨道相交，成为了落到地球表面的（火星）陨石。现在，研究者认为，火星陨石以每个月一个的速率到达地球。

研究者是怎样鉴别出火星陨石的呢？他们把有怀疑的陨石与地球岩石、（20世纪70年代后期发射的）海盗号火星探测器发送回来的火星资料进行了比较，才发现它们是所推测的火星岩石。一种有力证据是：火星陨石内捕获的气体与海盗号火星探测器测得的火星大气资料很匹配。要是这不够令人兴奋的话，那么一个科研小组在1996年宣称“火星陨石内一定的小结构是火星上早期微生物的证据”就更引起公众的注意了。这一宣布激起了公众强烈的兴趣和热烈的科学讨论，而研究机构继续进行研究，试图证明（或否定）这一奇妙的推断。在作者撰写本书时，行星科学家和天体生物学家仍在对此项研究的意义进行辩论，但是天体生物学家（天体生物学是发现和研究太阳系的地外生命的学科）对它的兴趣更为浓厚。

火星陨石不是地球上唯一已确认身份的天外来客。事实上，一大类名为“HED”（Howardites，紫苏钙长无球粒陨石；Eucrites，钙长辉长无球粒陨石；Diogenites，古铜无球粒陨石。它们的化学成分彼此相关，属于一个大家族）的陨石似乎来自小行星灶神星。这些陨石来客是由玄武岩浆（一种熔岩形式）形成的，但不是在地球上形成的。这意味着，它们的母体必定在以前某时期经历过火山活动。

灶神星及其V-型小行星的示例说明了撞击的威力和对轨道的影响（陨石在太阳系天体之间的转移机制）。哈勃空间望远镜所得到的图片和数据很清楚地表明，小行星遭受很大的撞击会抛掉大部分外壳，暴露深层物质。奇怪的是，灶神星在受到撞击时没有破碎，只有大块外壳抛到了环绕太阳的轨道。

我们如何知道一块特定的陨石是来自灶神星的？我们是依据小行星的化学光谱和表面亮度对其进行分类的。灶神星的很多光谱图表明它的大部分表面是由火成岩组成的，这意味着它的表层曾熔融过，或者可能从它内部流出的熔岩曾在其表面蔓延。灶神星不是任何更普通类型的小行星，而它的光谱与HED陨石的反射光谱很吻合，由此天文学家认为HED陨石是在撞击时从灶神星上砸出来的。

一些V-型小行星的轨道从灶神星（在2.36天文单位）延展到空间的一点，在这一点上，一颗小行星在“木星年”，即11.86（地球）年，绕太阳公转3圈。这就是有名的与木星（轨道周期）3:1共振。处于这样情况的天体很快就移到很



图 3.10 在任何晴朗的夜晚，观测者常常可以看到几颗闪亮的流星划过天空，它们是太空的小岩石块或尘埃高速闯入地球大气而烧蚀所形成的光迹。少数较大的残骸陨落到地面，成为可以收集到的陨石。彗星沿其轨道附近抛洒的碎屑成为流星（体）群，有十多个流星群的轨道与地球绕太阳公转的轨道交叉，当地球穿过流星群轨道时，就发生了流星雨。这幅图片是 2001 年狮子座流星雨，摄于澳大利亚。流星雨从狮子座呈镰刀形排列的恒星（右下）放射出来，猎户座（中左）位于银河的左侧

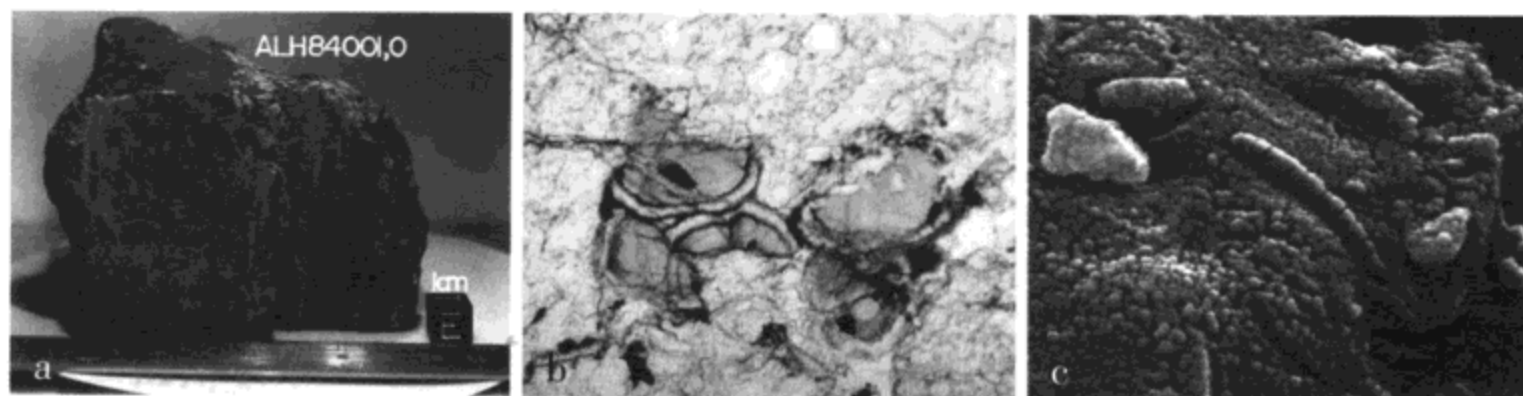


图 3.11 科学家在南极洲的艾伦 (Allen) 山发现了一块来自火星的陨石 (图 a)，通过对这块陨石的分析，科学家认为它可能在火星的最早期在水中泡了很久。该陨石的薄片显示出带状的碳酸盐球粒，这意味着火星表面存在过水 (图 b)。进一步研究这些带状的碳酸盐球粒，科学家发现了一些微形体，有些科学家认为它们可能是活性的细菌化石以及这些生命形式的衰亡遗骸或产物 (图 c)

扁的椭圆轨道，有些完全被抛出太阳系。在灶神星上造成巨大陨击坑的大撞击砸出很多碎块，它们成为较小的 V-型小行星——陨石。撞击之后，这些碎块离开 3:1 共振点而进入大偏心轨道，其中某些碎块的轨道与地球轨道交叉，成为陨石落到地球上只是时间的问题。

太阳与极光

对于太阳系中发生的事件和过程，太阳是“罪魁祸首”。太阳是太阳系中质量最大的天体，它的强大引力作用使得各行星、卫星和环系被“锁”在它们的轨道路径上运行。太阳是太阳系的主要热源，驱动各行星的大气变化。太阳（以太阳风形式）呼出的热气以每秒 400 多千米的速度向外喷扫。太阳经常发生或大或小的风暴，且有时可能变得狂烈，冲击行星的磁场、造成彗星尾巴扭折性断开。此外，太阳表面常爆发耀斑，发出很强的紫外线和 X 射线。

所有这些狂烈的活动可以直接影响行星大气上部，结果，在行星极区上空出现发光现象，即极光。极光是由于在行星高层大气中的高能电子与气体原子之间的碰撞而产生的。它们的碰撞“激发”了气体发光，也就是说，它们造成大气的不同气体发出不同颜色的光。例如，氧的激发产生绿色、黄色和深红色的光，氮的激发产生蓝色和紫红色的光。

并不只有地球在环两极地区出现气体发光带——极光，极光也出现在木星和木卫三、土星、海王星上。如同地球上的极光那样，这些极光也是这些天体捕获的电子与大气的气体原子碰撞而产生的。

发现在其他行星和卫星的极光证明了什么？证明了这些天体有磁场。事实上，气体巨行星的最明显特征不仅在于其巨大的体积和浓厚的大气，而且也在于它们具有很强的磁场。木星磁场捕获的高能带电粒子（有些来自木卫一）绕磁力线回

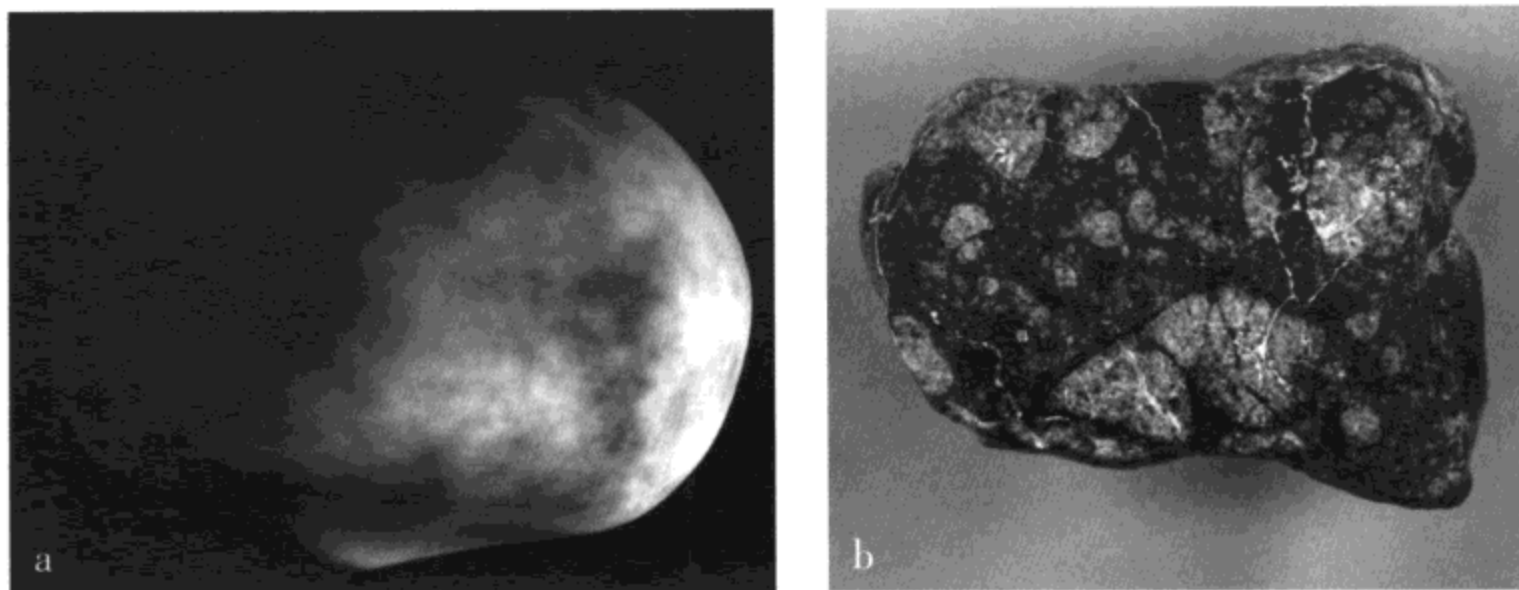


图 3.12 灶神星是太阳系的第三大小行星，其大小为 578 千米 $\times$ 560 千米 $\times$ 458 千米，它的轨道在火星轨道之外。图 a 是根据哈勃空间望远镜的观测资料制作的灶神星计算机模型。灶神星是不对称的，可能由于一次撞击而砸出一个 456 千米宽的陨击坑，使得其外形在南侧（图的下面）凹进一大块，在一次撞击中砸出的一个灶神星碎块（图 b）最终陨落在美国新墨西哥州

旋，产生很强的紫外辐射。这些辐射是“致命”的，太空探测器的电子设备若不安装在强保护器内就会在几秒钟内被毁坏。1979 年，旅行者 1 号探测器首先发现木星的极光，此后，地面天文台和太空观测台都拍摄到了木星的极光。

在木星的一昼夜中（因为木星的自转周期约为 10 小时，所以木星的一昼夜只有 10 小时），木星极光的亮度会发生变化。木星极光的一个最显著特征是所谓“木卫一的脚印”。因为带电粒子被捕获在木星的磁层内，且在磁流管内被驱动到两极，其“脚印”像木卫一绕木星转动那样，以每秒 5 千米的速度绕木星转动。假如观测者可以到木星上去观察此现象的话，就可以体验到它不像地球上看到的任何极光暴。在木星的云顶，光会充满天空，而气体在温度 6000 摄氏度以上就

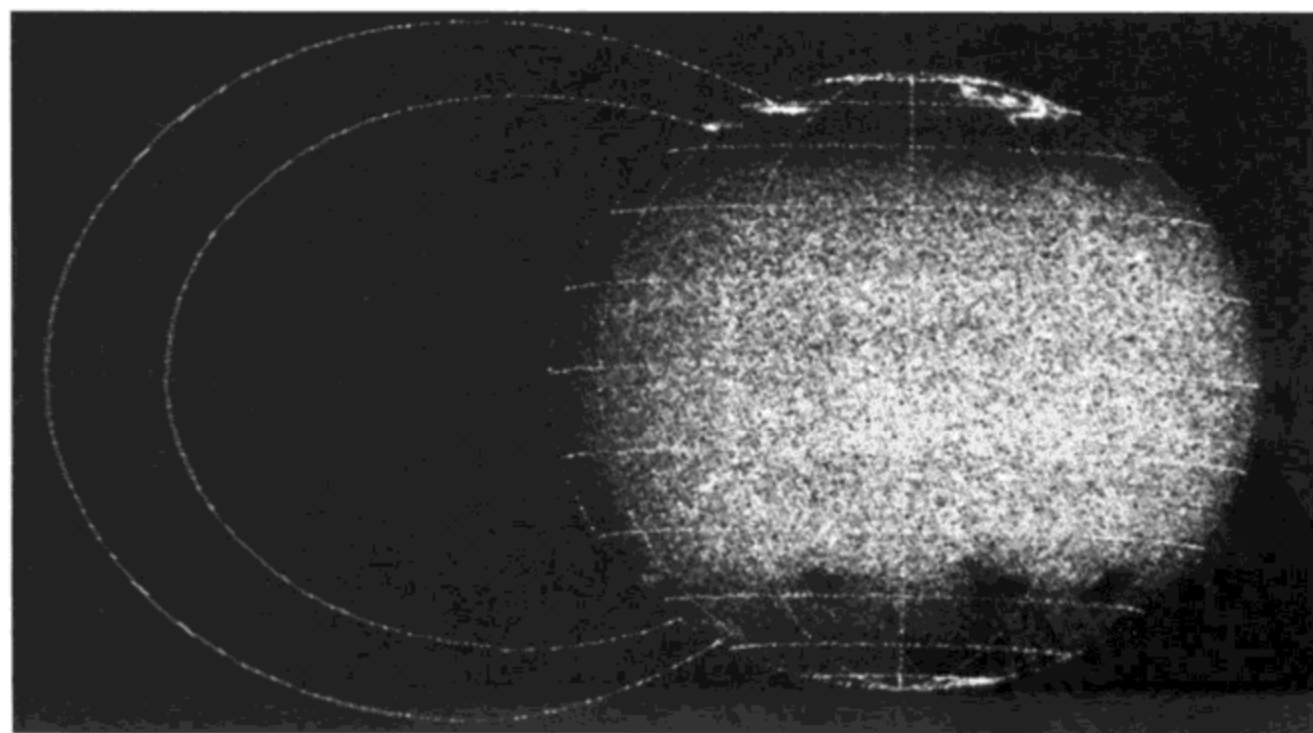


图 3.13 木星南北两极的极光。图中的木星磁力线说明了一个典型的木星磁场的产生过程及其对产生极光的粒子的引导。大部分磁场产生于木星的星核内部深处

图 3.14 地球的极光是居住在南北两极区的人们经常看到的天空奇观。这幅南极光的照片是发现者号航天飞机上的宇航员于1991年5月拍摄的

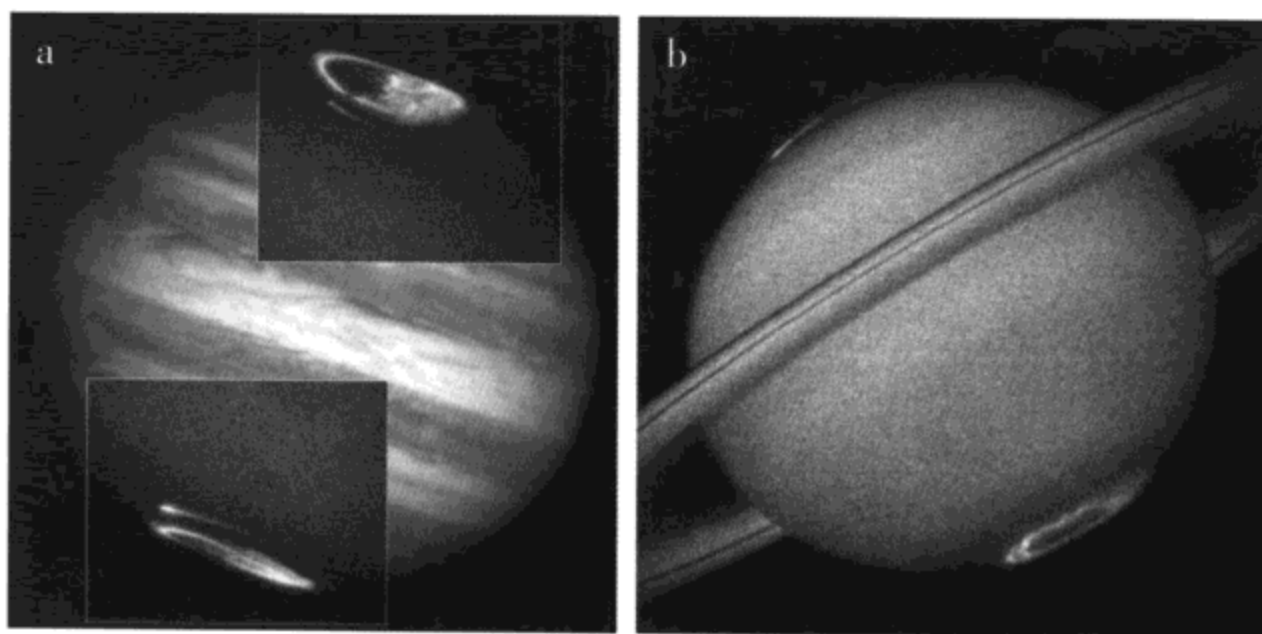
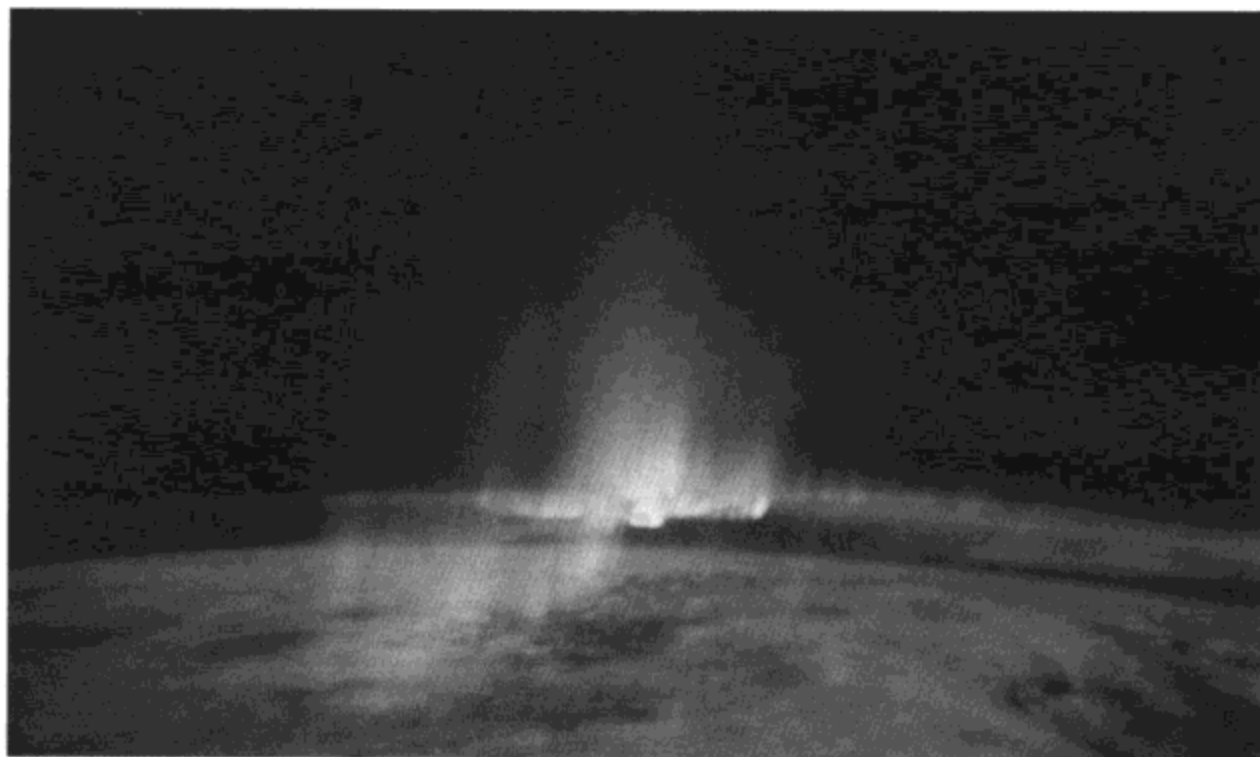


图 3.15 这些伪彩像是哈勃空间望远镜加上透过紫外光的滤光器所得到的观测结果。当从火山卫星木卫一发射出来的粒子被木星磁场捕获，也可以形成木星磁极周围的极光（图 a）。土星极光的波纹、图纹、亮度都是土星磁场与太阳风之间的强力斗争的证据（图 b）

会发光。

- 64 在旅行者号探测器于1980年和1981年观测到土星极光之后，20多年来，具有紫外成像功能的哈勃空间望远镜研究了土星极光。它也发现了木卫三的两极有极光辐射的证据。可能在木卫三的冰表面下存在有水的海洋，因含盐导电而产生磁场并与木星更大规模的磁场相互作用。

比较行星学

以地球为基准，我们对所有的行星进行比较研究。或许我们进行这种研究的

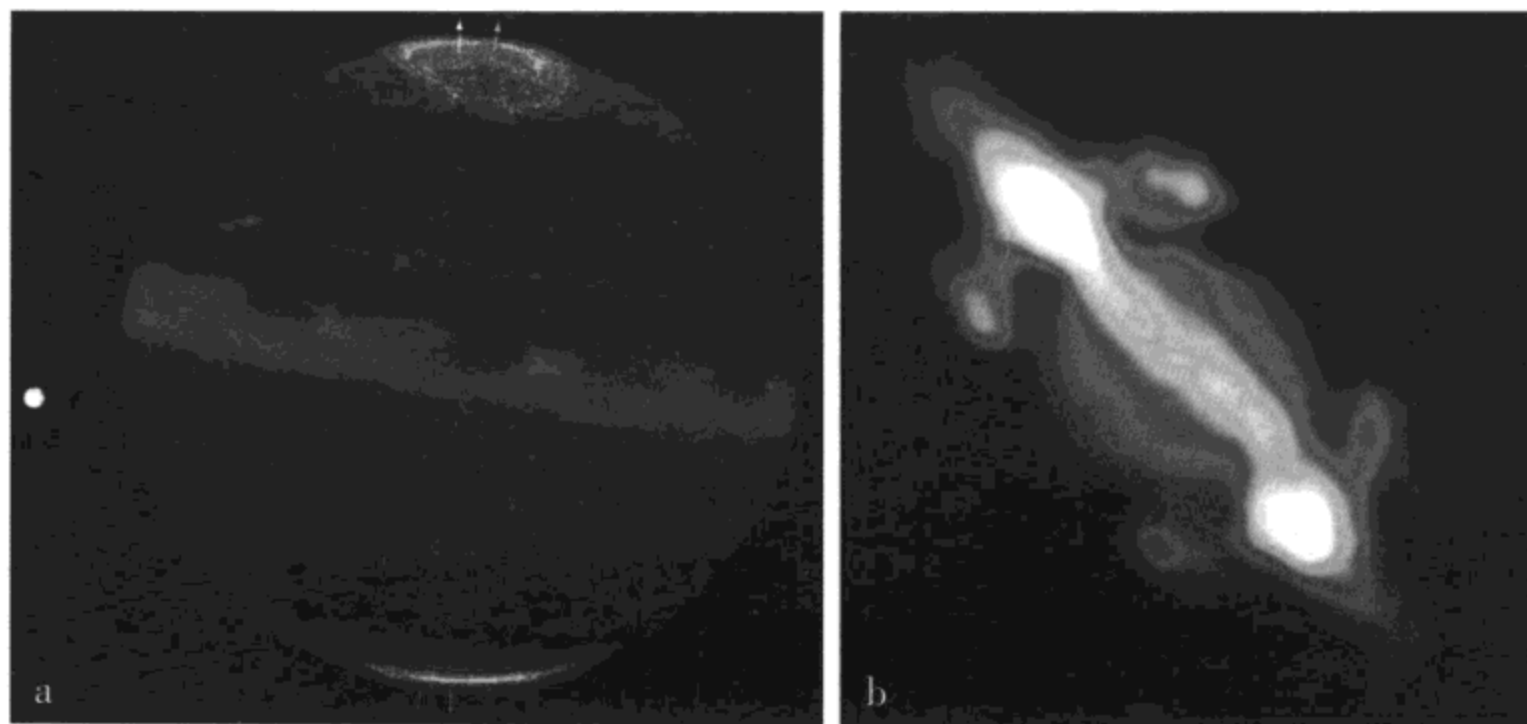


图 3.16 位于智利的欧洲南方天文台所拍摄的木星伪彩红外像，显示了木星极光辐射的热量（图 a）。一架射电望远镜“看到”的木星好像是星空的一个延展的蝌蚪形天体（图 b）。被木星磁场捕获的电子产生奇强的射电信号。木星位于扁圆形中央区，外面的“脚”是木星磁场中带电粒子发出射电的证据

原因在于地球是人类起源的地方，并且我们最熟悉它的系统和过程。显然，如果我们能够解释地球上的某一现象，那么当这一现象在别的行星上出现时，我们也能加以解释。比较行星学不只是评估各行星与地球如何相似的问题，同时还探讨太阳系各个行星世界彼此的差异性。开展这种研究的一种方法是比较行星共同拥有的结构和过程，比如我们刚讨论过的撞击事件。 65

似乎与地球最相似的行星是火星。让我们把火星作为比较行星学的简单练习。火星的峡谷和陨击坑、极冠、变化的云缕总是让人们着迷。当火星运行到离地球足够近时，用小的家庭天文望远镜就可以看到火星表面的暗标志。在一个火星年（译注：相当于 1.88 个地球年）期间，观测者可以观察到火星的极冠随季节变化而增大和缩小。在一定的年份，火星的尘暴几乎笼罩其全球而使我们看不到它的表面。

我们对红色行星——火星一直持有一些相当大的文化偏见。在早期宗教中，火星是战神，有点令人心生恐惧。在 20 世纪中期第一艘探测器去火星之前，人们对火星的兴趣并非集中在这个“战神”将给人类带来什么样的惩罚，而是集中在有关火星的科幻小说——像《世界大战》或艾德加·赖斯·巴勒斯 (Edgar Rice Burroughs) 所著的火星冒险科幻小说系列。这些冒险故事都设想火星上有生命。

正如我们所知，火星着陆器并没有发现火星上存在生命的可靠证据，这使一些关于探测火星生命的飞行设想暂时搁置下来。这就是科学的作用之一——让人

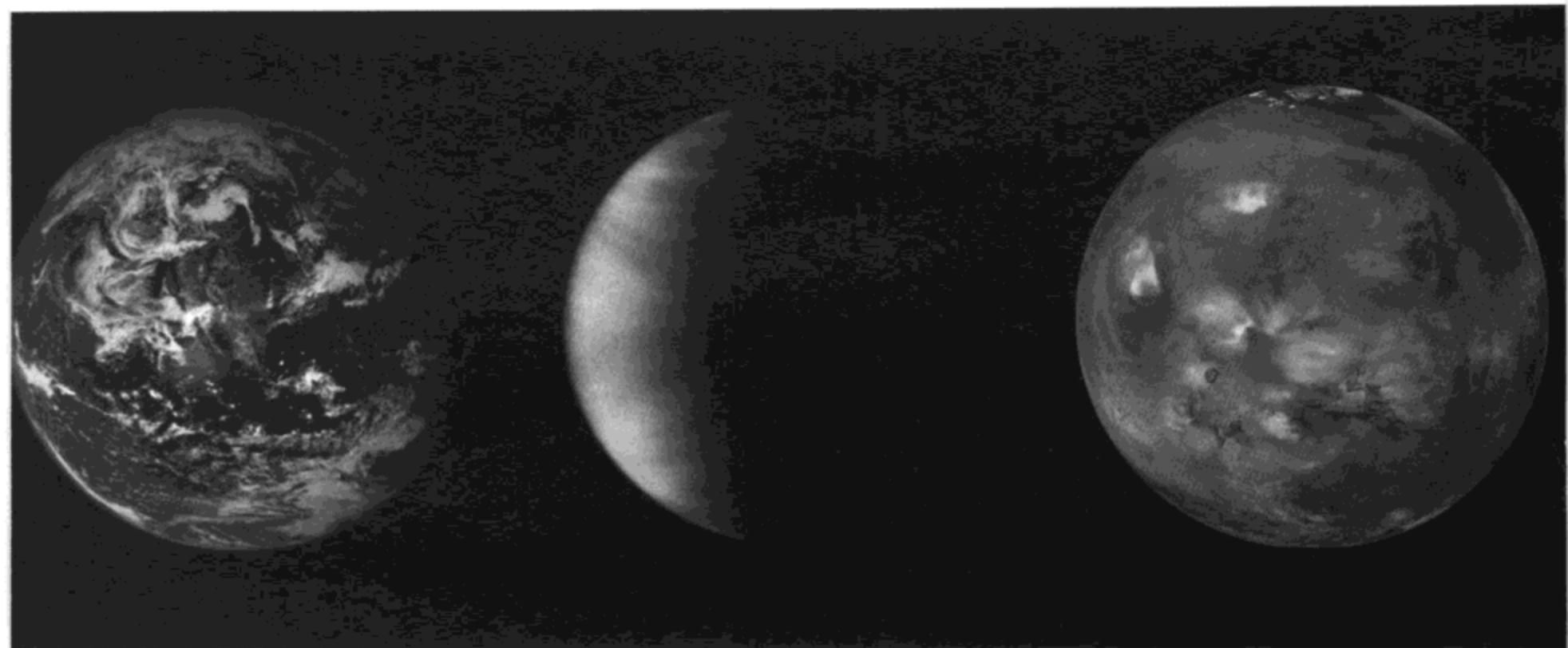


图 3.17 左：克莱门汀号探测器看到的多水的蓝色地球，墨西哥处于正中央。中：浓云笼罩的金星，这是哈勃空间望远镜拍摄的紫外像。右：根据火星全球勘测者号轨道探测器在 12 天内所拍摄的资料，科学家们绘制了火星全球图。该图显示，蓝白色水冰云悬在火星的火山上空，近看可以发现一些陨击坑、一个巨大的裂谷、随季节变化而增大和缩小的南北极冠以及被风吹扫的宽阔平原。虽然火星研究者认为火星的很多水储备可能封闭在称为永冻土的地下冰中，但从图片来看，火星表面非常明显地没有任何自由流动的水

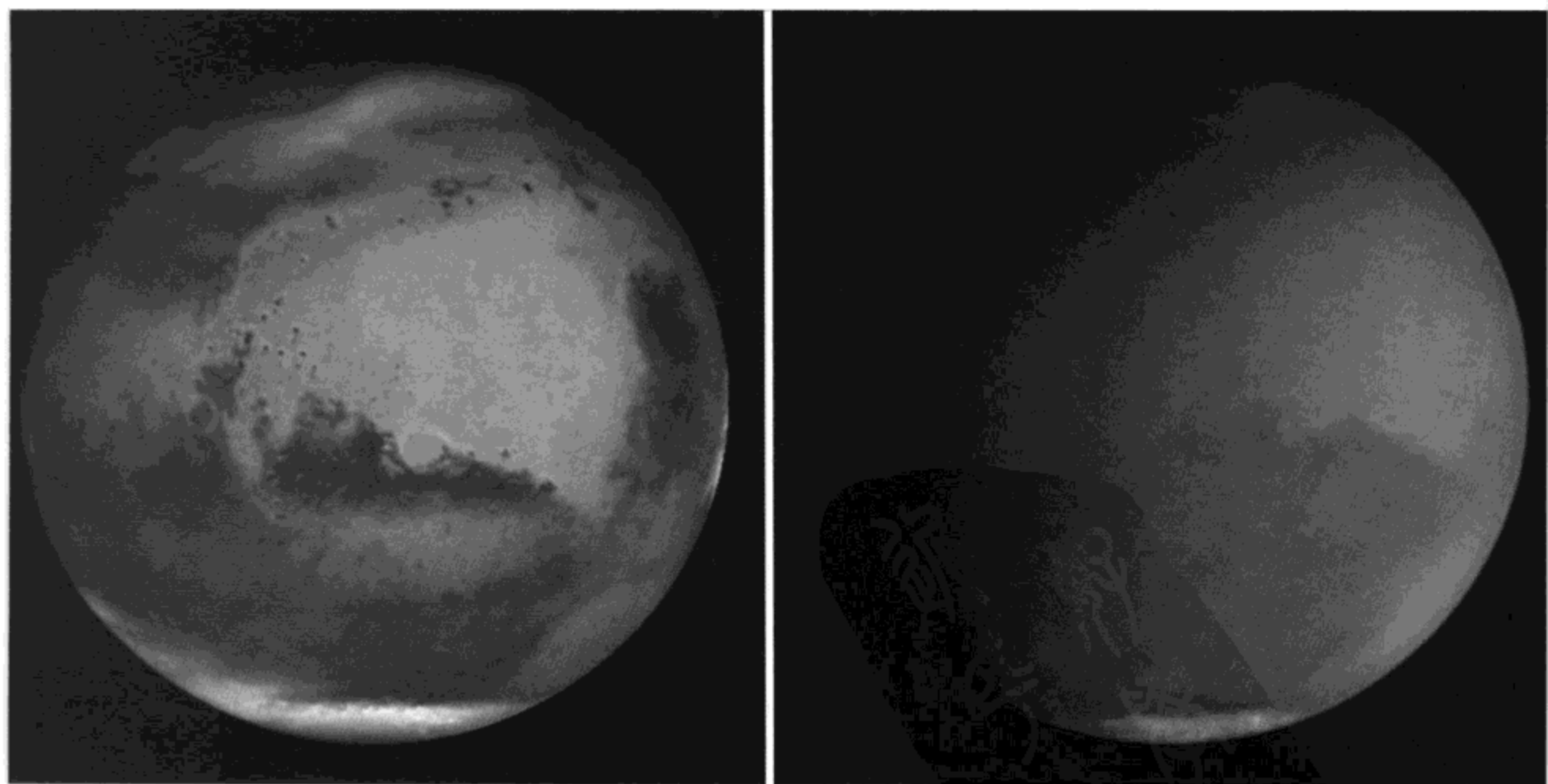
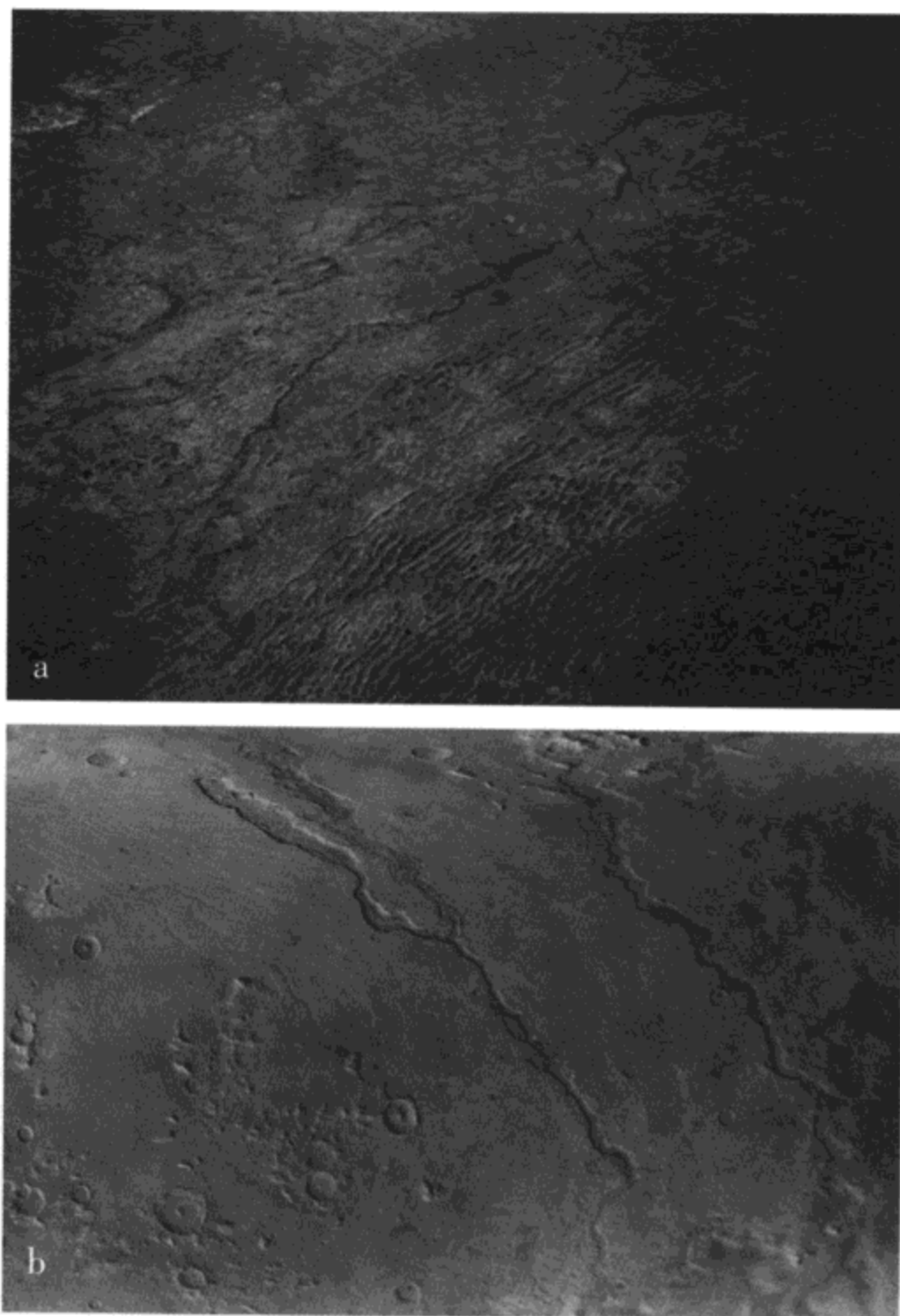


图 3.18 2001 年，火星观测者号探测器观测到一次在几天时间内便席卷火星全球的尘暴。这次尘暴持续了几个月，除了火星最突出的特征外，它遮住了火星的多数表面特征

图 3.19 比较行星学对火星上和地球上的特征进行比较。知道地球上的一种地形是如何产生的，就能帮助我们确定火星上同样的地形是怎样形成的。试找出这两幅图片中可能是流水河床的地方。在图 a 中，只有右上角的绿斑能让我们确定它在地球上的位置——美国的内布拉斯加州沙丘中的一个干旱地带。图 b 为火星上的三个峡谷：道谷 (Dao)、尼日尔谷 (Niger)、哈马基斯谷 (Harmakhis)。这些河谷可能在遥远的过去因灾难性洪水而形成



们少一点美丽幻想，多一点真实。然而，在这样的情况下，火星的真实性反而使它成为更加引起人们关注并急于造访的地方，但对于一些想要成为火星探险家的人来说，到火星的旅行不会很快就实现！

为了了解火星上发生了什么，我们又可以将地球作为基准，这很有帮助。科学家在地球上选择一些酷似火星地貌的地方，建立人类登陆火星的演练基地。地球北极区德文 (Devon) 岛上的霍顿 (Haughton) 坑就是一个很好的例子。过去的几年里，几个科学家小队在这个荒凉的、冻结的沙漠生活和工作过。探险家也在南极洲建立了一些基地，而在地球上其他一些地方，也计划建立这样的“火星 69 演练营地”。但是，为了更准确地了解火星上的变化，我们需要用尽可能多的方法对火星进行长年的监测——发射飞船探访火星，用哈勃空间望远镜和地面天文



图 3.20 毫无疑问，火星在过去某个时候的水流造成了现在的火星地貌。这是火星全球勘测者号轨道探测器拍摄的火星萨瑞南台地（Sirenum Terra，布满古老的撞击坑）的两个不同撞击处的高分辨率照片，显示陨击坑边上的环形山上的沟状结构，我们看起来非常熟悉。一些沟谷可能是由于遍布火星表面的地下水被撞击释放出来而冲刷形成的。即使我们不能准确知道这些沟谷是何时形成的，但它们看起来确实与地球上水侵蚀的沟谷很相似。仔细看两张照片，就会发现其他我们在地球上非常熟悉的地貌——沙丘和散落着（从坡上滚到陨击坑底部的）岩石的空地

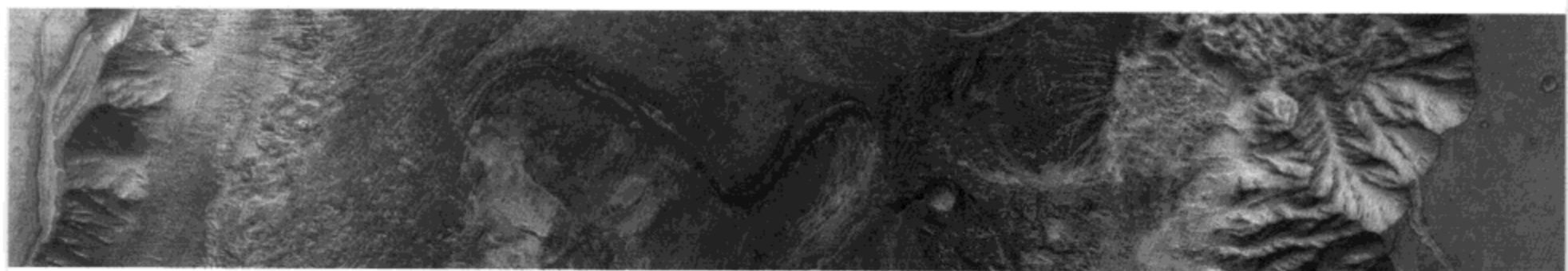


图 3.21 火星奥德赛号探测器用“热辐射成像系统”（THEMIS）继续扫描火星表面。这个仪器对电磁谱的可见光和红外波段都很灵敏，它用于研究火星尘埃和岩石的矿物组成。这幅伪彩红外像上的颜色差别代表火星表面成分的差别。这幅图片展示了巨大的“水手谷系”内的康德-查斯马谷（Candor Chasma）的一部分。假如在过去某个时候这里存在液态水的话，就会对岩石的矿物组成产生影响。在红外像中，在此表面上的任何水冰沉积都会显示为暗斑

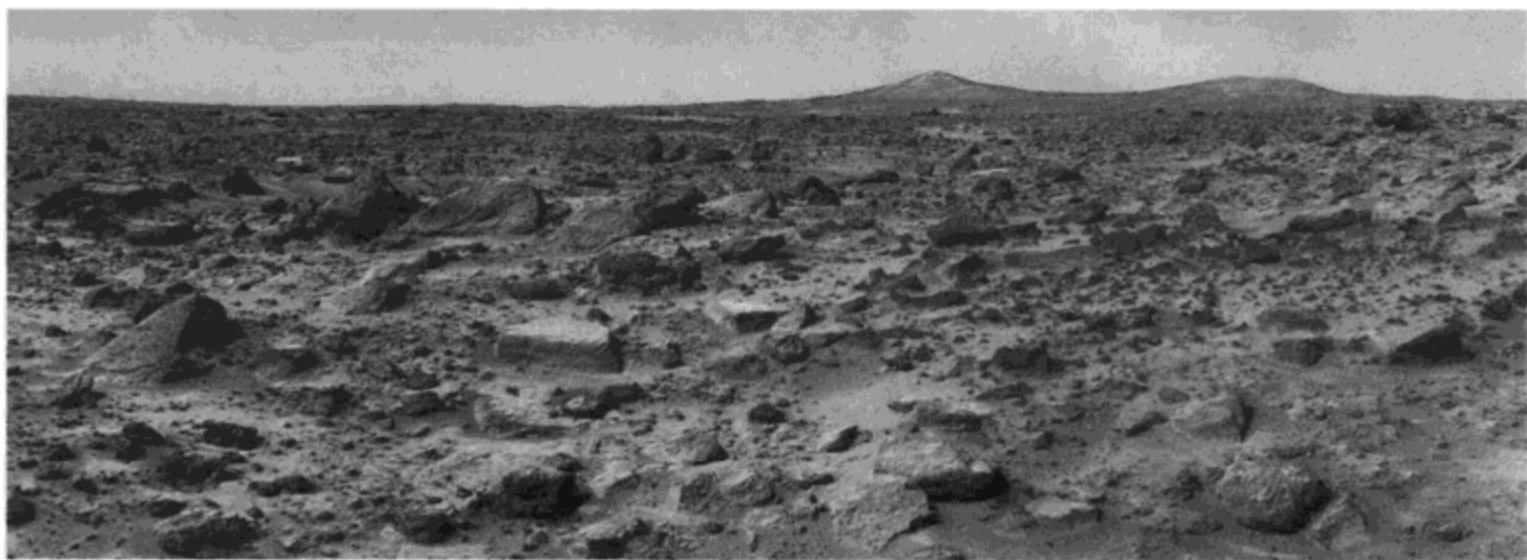


图 3.22 火星上战神谷 (Ares Valles) 的地貌。从外空俯视与测绘一个行星的地图是一回事，而更多地了解行星表面的方法是实地登陆并四处走一走。实际上，图片中的地貌延伸了 7000 万千米，类似地球上的沙漠地貌。1997 年，火星探路者号探测器弹射的着陆器在火星战神谷的辽阔岩石“公园”着陆。走向很长的沟渠穿经平原，平原上岩石散布。风吹起的沙尘堆积在岩石之间。在远处，是名为“双子峰”的两座小山。迄今为止，所有成功的火星着陆器都选择在较安全的平坦地区着陆，它们为我们提供了大量有关火星的资料和图片。火星上一些真正迷人的地方在水手谷系的峡谷和火山顶——着陆器不易安全着陆的地方

台对其进行观测。从 20 世纪 70 年代开始并一直到现在，我们仔细地进行着火星的实地探测。甚至在本书撰写的时候，就有两艘飞船正在环绕火星的轨道上连续地测绘和拍摄火星干燥而多尘的表面，并且有更多的飞船正在飞往火星的旅途中。

火星的过去是充满苦难的，到处都有证据。除了大量的陨击坑、峡谷、平原和破裂地体，我们对于这颗红色行星的很多问题归结到寻找能够证明火星早期具有比现在浓厚的大气、气候比现在温暖湿润的有力证据。如果火星在幼年时期的确有更多的水（和更浓厚的大气），下一个要问的问题是：火星一开始是否拥有和地球一样多的水？如果是这样，那么，这些水发生过了什么？

水曾经“装饰”过火星表面，这是毫无疑问的。具有很多支流的沟渠散布在火星多尘的平原上，看起来非常像地球上的干涸河床。古老的、散布岩石的平原呈现出一种被灾难性洪水冲刷过的景象。水都流到哪里去了？水现在在哪里？科学家认为一部分原来的水资源闭锁在地下永冻土中，但看起来很多水逃逸到太空。火星研究者仍然在争论水怎么会存在于低气压环境的火星表面。到现在为止，火星表面是否发生过灾难性洪水、水是否渗入地下、是不是水损毁火星表面都还没有明确答案。

只有稀疏大气、没有表面水的火星在向我们挑战。我们怎样解释显然曾经潮湿的火星世界在短时期内就失去了水和大部分大气？火星表面是否一开始就没有水？这可能吗？当行星科学家认真分析火星探测器发送回来的丰富图像和数据时，这些就是他们试图解答的问题。

太阳系的火山

71 似乎在太阳系的行星体上都发生地貌改造过程，火山活动就是很好的例子。我们都熟悉地球上的火山，它们不只是活跃地改造大陆表面，还改造海底表面。火山活动把熔岩从地下深处带到地壳，“吐出”一些气体补充到我们的

大气层。

科学家已经证实，在整个太阳系，火山活动改变行星表面，并向大气层补充气体。当一个行星世界从内部加热时，就产生火山活动。在地球及其两个姐妹行星——金星和火星上，加热是由深到星核内的放射性元素衰变所致，称为放射能加热。同时，各行星也存在从形成时期遗留下的附加热量。在类地行星上，加热使熔岩（称为“岩浆”）上涌到表面，同时涌出的多种气体混和到大气。熔岩流

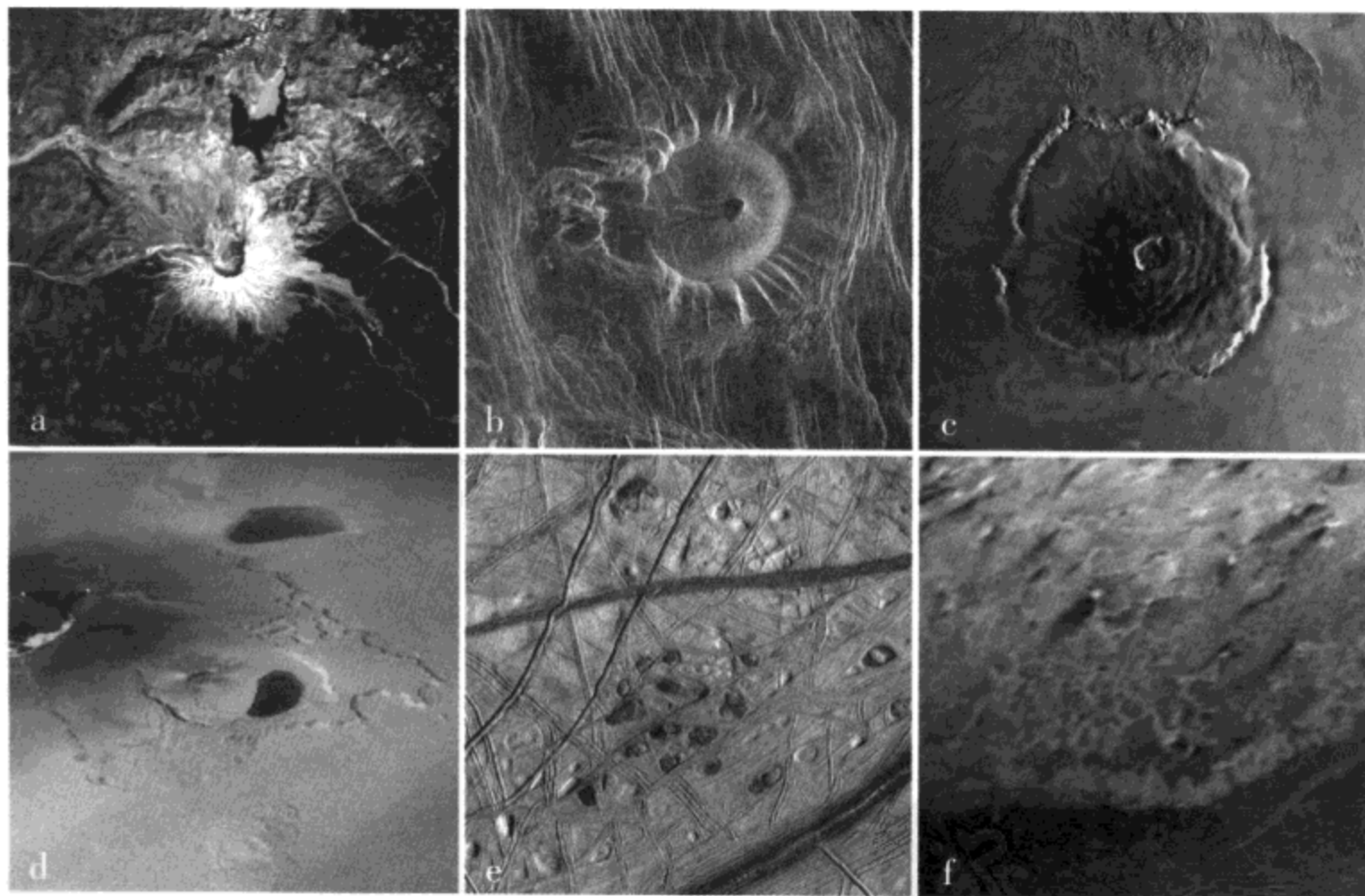


图 3.23 从轨道飞船看到的火山。图 a 为地球上的圣海伦火山。图 b 为金星上的艾斯特拉 (Eistla) 区的火山结构。图 c 为火星上的奥林匹斯火山 (Olympus Mons)。它们说明在这些行星世界上可以发生不同形式的火山活动。图 d 为木卫一上的 Tvashtar Catena 火山链，一个火山口喷发出的热熔岩漫过表面，两个小亮斑是熔岩暴露到表面的岩浆流“足尖”，较大的橙色和黄色带是 60 千米长的、正在冷却的岩浆流。木卫一连续的火山活动喷发的硫云覆盖表面，并把受热粒子送到环绕木星的轨道。图 e：木星的冰卫星——木卫二的表面像“熔岩泉”翻腾。木卫二表面下正在发生的某种运动加温冰壳，从下向上输送暖冰，较冷冰的冻结上层向星核下沉。微红的斑点和浅坑散布在迷宫般的、多脊的表面，它们可能是我们破解木卫二熔融冰海洋的成分的线索。图 f：在很远的海王星，海卫一有很多“间歇泉”形式的冰火山活动，其暗羽看起来像黑色污迹横过表面

可能是流动性很好的，也可能很粘稠而流动性不好。有时，像 1980 年圣海伦火山疯狂爆发那样，一座火山把自己“吹”开，喷出翻滚的熔岩流、火山灰和大量气体。地壳基本上是一系列浮在地幔层上面（地幔本身又包裹熔融的外地核）的板块，我们常可以在两个板块交界处找到火山。在其他区域，一些热斑（hot spot）足以熔融岩石，使岩浆“冒泡”到表面。夏威夷岛链是在太平洋板块水平漂移，恰好经过这样的热斑而形成的。

在 20 世纪 90 年代麦哲伦号金星探测器造访金星之前，没有人十分了解浓云笼罩的金星世界上的火山活动的程度。金星的星核与地核很相似，但金星表面只有一个全球板块（而不像地球那样有几个板块）。金星上的火山流由流动性很强的熔岩组成，使得表面很热、易变形，在某些地方，熔岩流堆挤为山脉和某些很反常的饼状丘。

火星上的火山作用说明，这个红色的行星曾是一个很活跃的世界，它可能还没有死寂。与金星差不多，火星也不像是有多个板块浮在其幔和核上面，而是在外壳较薄弱的地方分布着一系列火山。火星上最高的火山是高度为 27 千米的奥林匹斯山，高高地耸入稀疏的大气层。虽然现在火星似乎没有任何火山活动的迹象，但有充分的证据显示它曾经是火山活动十分活跃的世界。

当我们穿越火星轨道往外太阳系前进，火山活动的面目突然改变，因为我们研究的已不是类地行星，而是环绕气体巨行星运行的几颗卫星。在这些小的火山世界中，最著名的是木星的岩石卫星——木卫一。在旅行者号探测器发现木卫一的火山性质的证据之前，科学家推测那里发生着火山活动。通过旅行者号探测器观测到的资料，科学家发现木卫一的火山活动的强烈程度令人惊叹。旅行者号探测器拍摄到了至少 8 个正在喷发的活火山和 6 个新火山。

木卫一处于跟木卫三和木卫四轨道共振，这使得它受到特别强的引力影响（潮汐效应），导致整个木卫一脉动、变形，并在这些变动中产生能量，加热了木卫一内部，最终熔融岩石。喷出表面的是含硫的熔浆，呈现为黄色或别的颜色，喷出的二氧化硫直冲到稀疏的大气中。

当我们来到木卫二（木星的一颗卫星）或海卫一（海王星的最大卫星）这样的冰世界，火山活动变为将冰输运到表面的过程。在木卫二上，较暖的冰穿过泥泞的海洋并冲破表面涌出；然后，变冷的冰又缓慢地沉入烂泥层。研究者弄不清楚的是：在木卫二附近的其他卫星冻结得很坚硬的情况下；是什么加热机制使得这个蓝色小世界（木卫二）能够保持相对温暖并以冰火山更新自己的表面。可能是附近卫星对木卫二的潮汐效应使木卫二变热（“潮汐加热”），也可能是由于岩石质小星核的放射性产热。在海卫一上，太阳晒暖甲烷冰外壳，外壳又

加热下面的氮冰冻结层，小的火山口起着压力阀的作用，将氮气和混合的有机化合物抛入稀疏的大气中。

行星家族的大气比较

天文学家喜欢进行天体分类，特别是太阳系的天体分类。你可以把太阳系的天体分为不同的类别，而怎样归类取决于你想研究什么。在内太阳系，我们有4颗所谓“类地行星”：水星、金星、地球和火星。往外，存在4颗气体巨行星：木星、土星、天王星和海王星。再往外就是冰天体世界，包括冥王星、冥卫一、柯伊伯（Kuiper）带天体、气体巨行星的较大卫星。此外还有小卫星、行星环、小行星、彗星、陨石。

进行天体分类的另一种方法是把它们分为有磁场的和无磁场的两大类。或者，假如你寻找可见的特征，很有用的分类方法是分为“有大气的天体”和没有任何气体层的天体。这样就可以把地球、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星、木卫一、木卫二、土卫六、海卫一归为一类，而将太阳系的其余天体归为另一类。但这样做就遗漏了冥王星和彗星。冥王星仅在1个“冥王星年”（即绕太阳公转1圈的时间或248个地球年）的部分时间里少量表面冰蒸发为大气。彗星在走近太阳时蒸发出彗发，而远离太阳时失去彗发。它们可能是我们行星家族大气变化的极端例子。通过行星体的比较，还得到别的情况：相似的结构却产生令人诧异的差别。

当你用比较的方法考察行星时，会立刻发现地球的大气与其他天体的大气并不十分相同。那么，为什么科学家坚持用地球作为基准来衡量所有的其他行星呢？我们确实是从研究地球的大气圈得到大气分层结构的概念，即使是火星或海卫一的稀薄的大气层，也是底层大气浓密而高层大气稀疏，但我们不会对此感到奇怪。4颗气体巨行星（木星、土星、天王星、海王星）的大气的主要成分是大量的氢和氦，一颗行星（地球）的大气的主要成分是氮和氧，金星大气的主要成分是二氧化碳和少量二氧化硫，火星大气也是以二氧化碳为主，还有少量氧和水蒸气。假如你必须按相似性分类和这样定义太阳系天体的大气的话，那么，木星、土星、天王星和海王星就有典型的大气。

木星是超级的行星世界，它有最强的引力、最大的大气风暴、最强的磁场、最美丽的彩色云、最浓密的大气、最大的卫星和数目最多的小卫星以及最薄的环系。在大气下面，木星分为3个圈层：分子氢和氦的外层、液态金属氢的中间层和小的固态星核。

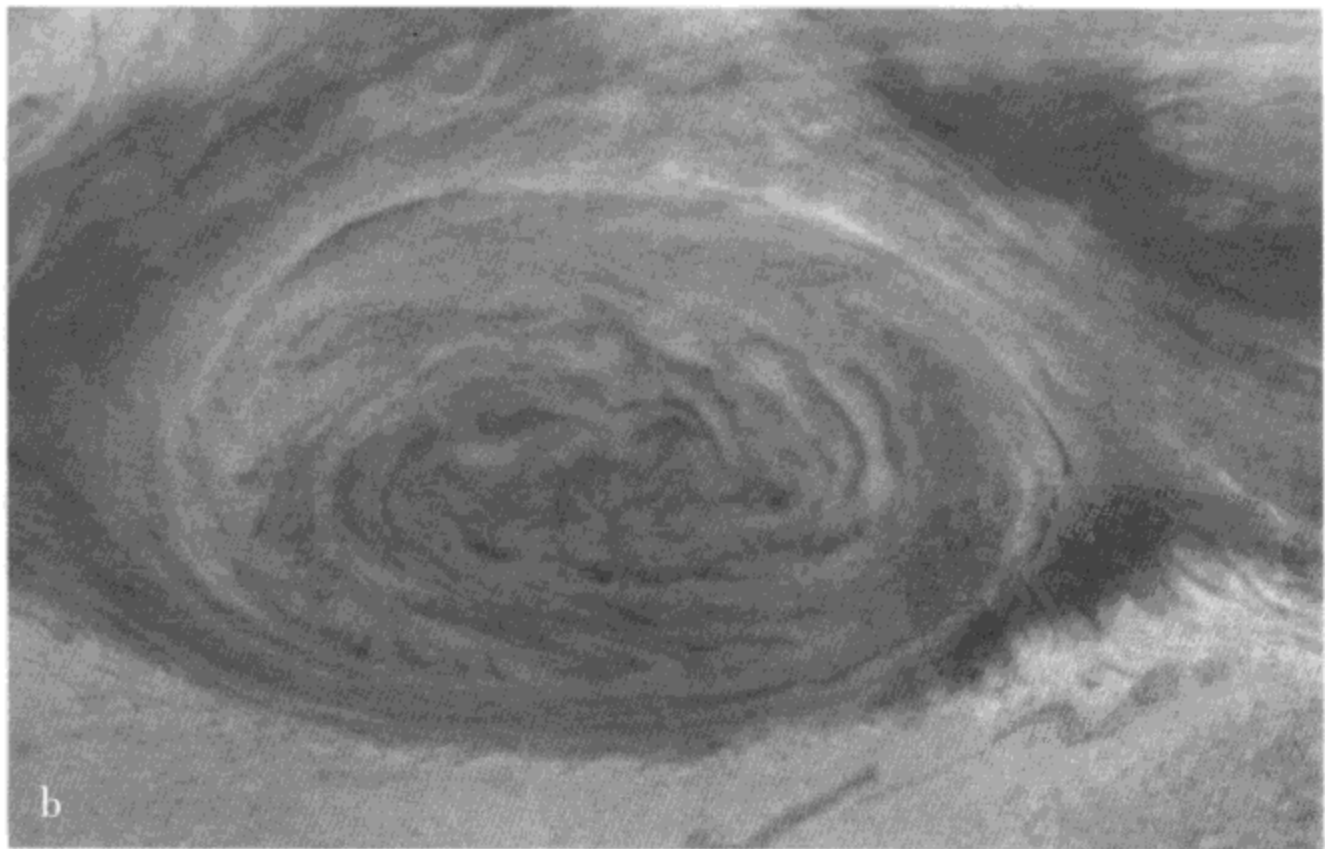


图 3.24 图 a: 卡西尼号飞船在接近木星时发送回来的木星图片，它与旅行者号探测器所拍摄的图片一样清晰。图 b: 伽利略号探测器得到了大红斑的近距细节照片



图 3.25 1995 年，伽利略号飞船释放的一个子探测器进入木星的上云层。降入木星赤道附近一个“热斑”时，子探测器发送回来有关该区的化学组成、温度和气压的数据。通过对这些数据进行计算机处理，科学家得到这幅三维视图：从两云层之间的一处，我们看到的是西北 34000 千米范围的情景：温暖区（蓝色）清晰可见，沿条纹线运动的云在接近热斑时下沉并蒸发，而高处的雾霾层正在被热气压往上轻微推高

74 事实上，木星最显著的特征就是它的大气。交错的亮带和暗纹使木星看起来像华丽的云条纹。因为云的亮带和暗纹相互吹过，各种形状和大小的风暴在高层大气盘旋。这种持续的狂暴的运动产生令人难以置信的风剪切和在云带位移。伽利略号飞船的科学团队成员对这些位移特别感兴趣，准备释放一个专门的子探测器降入木星大气内部。在子探测器向木星降落的 1 个多小时内，它测量了云层顶之上 1200 千米范围内的温度、压力、密度、气体成分、云的分层、能量流、辐射和闪电。

伽利略号探测器所得到的数据改变了人们长期以来对木星大气的某些看法。数据分析显示，木星赤道区的风速每小时 500 多千米，伸展到厚厚的大气的深处，而限于上层大气。科学家希望探测器能够测量他们期待搜寻的三层大气的温度和密度，但探测器没有发现这样明显定义的区域。木星有可能存在三层大气，但探测器进入的是比预期更干燥、更温暖的区域。

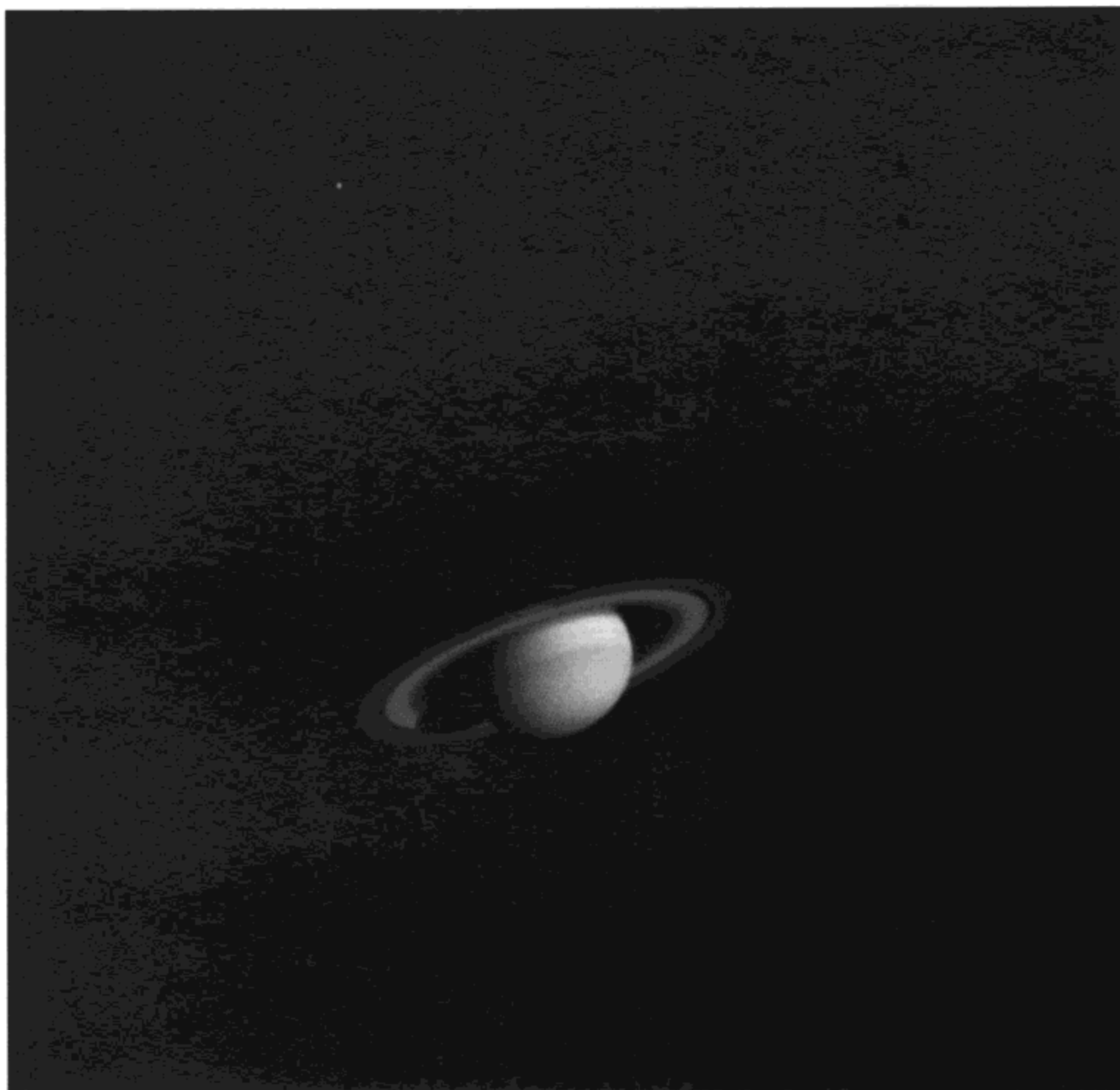


图 3.26 这幅图片是美国宇航局的卡西尼号飞船在 2002 年 10 月接近土星时拍摄的，这也是土星第一张彩色合成像。土星似乎很远且很宁静，土星的最大卫星——土卫六在左上方。土卫六是卡西尼号飞船的主要研究对象，该飞船将释放子探测器——惠更斯探测器。惠更斯探测器于 2005 年初降入土卫六大气，并报告了土卫六表面的情况

大红斑是木星大气最显著的特征。它像一只生气的大眼睛，从木星凝视外界。它是一个巨大的高压风暴——从地球上看得见的木星飓风，在木星的南半球盘旋了至少 400 多年。大红斑非常大，其宽度超过地球直径的 3 倍。

土星也是一颗气体巨行星，因其美丽光环而著名，久为天文学家和天文爱好者所关注。然而，跟木星一样，它有浓密的富氢大气、液态分子氢的外层、液态金属氢的中间层和小的岩石核。土星的大气与木星的大气一样活跃，但土星高空的雾霾层使得我们看到的云顶呈黄褐色。由于我们对土星非常感兴趣，因此哈勃

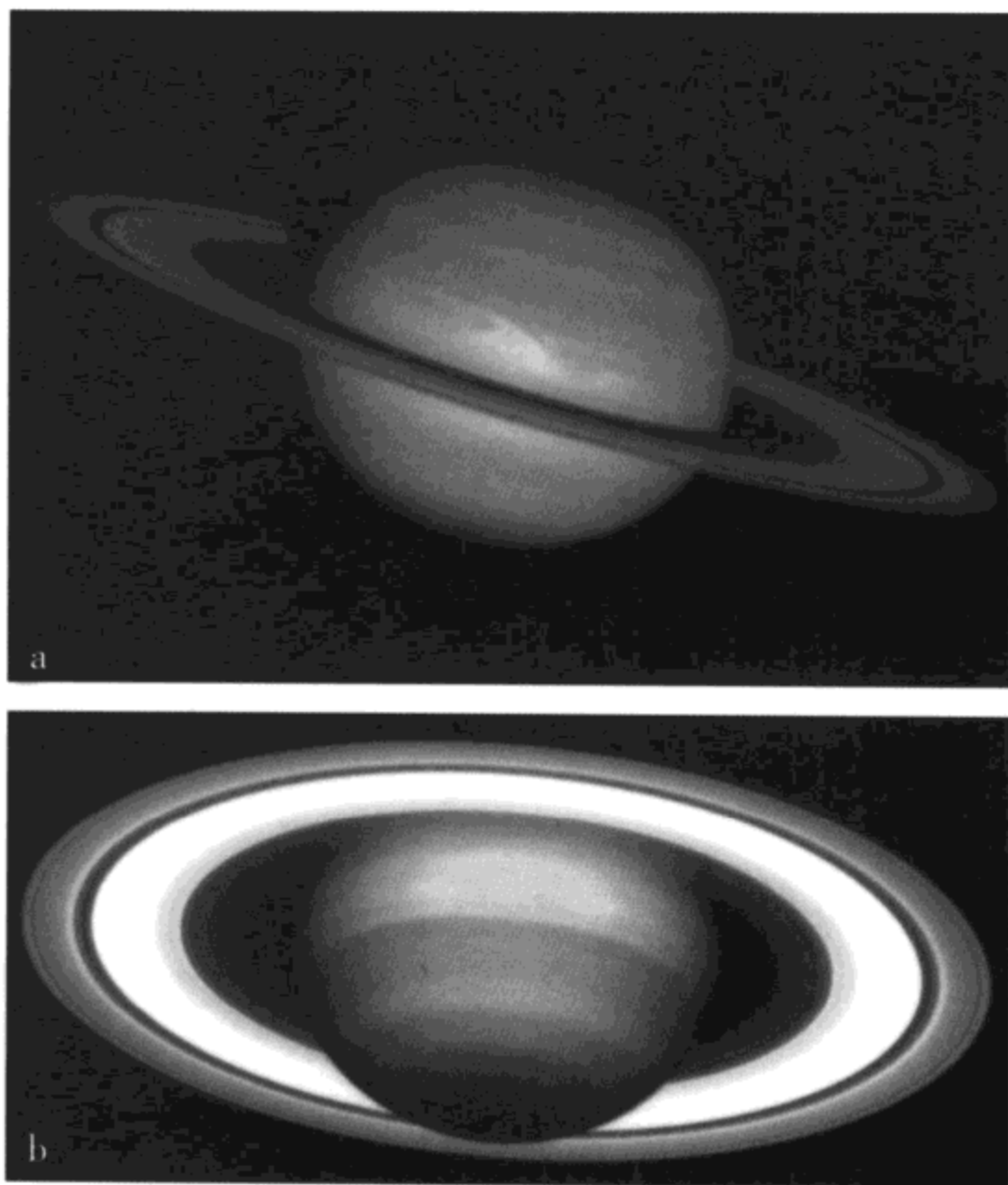


图 3.27 哈勃空间望远镜拍摄的土星照片 (图 a), 显示在土星大气高云层有罕见的赤道区风暴。箭头形的风暴是由较低云层上涌的暖气体产生的。在哈勃空间望远镜拍摄第一批土星照片之后的几年, 设在智利的地面甚大望远镜使用自适应光学技术和专用红外滤光器 (增大明锐度) 拍到了土星照片 (图 b), 其效果与哈勃空间望远镜拍摄的照片“匹敌”, 它也是从地面天文台得到的明锐度最高的土星环系照片, 照片中土星的主环结构、卡西尼环缝 (似乎分裂环系的暗带) 和恩克环缝 (环系外边界内的小间隙) 很明显

空间望远镜选择土星作为要研究的第一批行星。实际上, 在升空 4 个月后, 哈勃空间望远镜首先对准的就是土星。

1990 年 8 月 26 日, 哈勃空间望远镜拍摄到很多可以与旅行者号探测器所拍照片的品质相媲美的土星照片。从这些照片看, 土星仿佛仅比月球远 2 倍似的。实际上, 土星离我们 14 亿千米远, 约比月球远 3700 倍。哈勃空间望远镜所拍摄的土星北半球的照片显示了土星的高云层的带纹结构。在土星光环上, 著名的卡西尼环缝 (最大的暗空隙) 和环系外部被称为恩克 (Encke) 环缝的窄空隙清晰可见。在那之前, 人们还从未从地球上拍摄到恩克环缝, 这使得哈勃空间望远镜拍摄的照片弥足珍贵。

大约在哈勃空间望远镜拍摄第一批土星照片之后的 1 个月, 业余天文观测者宣布在土星赤道北区发现一个大的白斑在发展。天文观测团体马上建议哈勃空间望远镜用更多的时间观测土星大气发生的现象。紧急策划了几星期之后, 哈勃空间望远镜对准了土星并进行拍摄。对于行星科学家来说, 这又是一个令人兴奋的

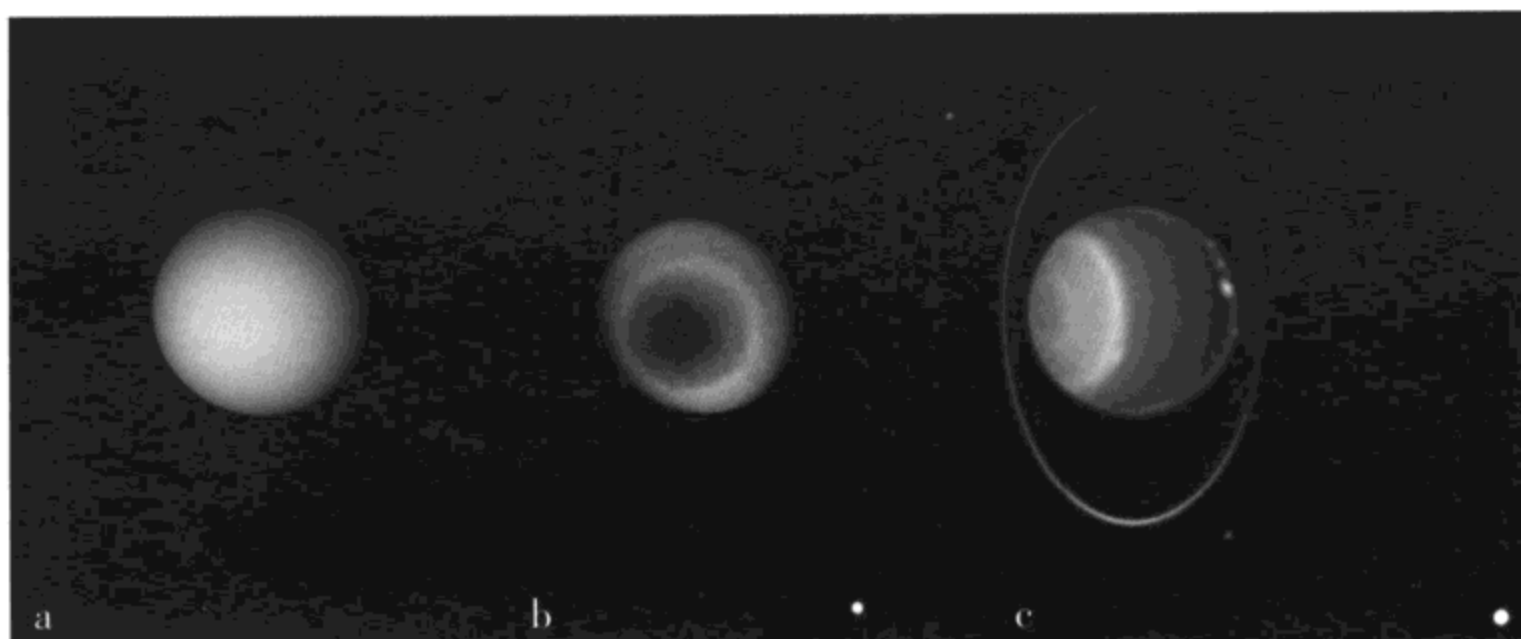


图 3.28 旅行者 2 号探测器在 1985 年探访了天王星，在 1989 年探访了海王星。哈勃空间望远镜曾几次观测这两颗最远的气体巨行星，用红外敏感仪器探测它们的大气变化。在可见光波段，蓝色的天王星看起来毫无特征（图 a）；但是当旅行者 2 号探测器使用配有专门滤光片的照相机，拍摄到高层大气中蓝绿色甲烷雾霾层下面的情况时，天文学家就可以绘制伪彩像（图 b）来显示较低层云的结构。暗的极冠和较亮的带是大气现象，类似于太阳紫外线作用下的大气化学反应产生的烟雾。在哈勃空间望远镜拍摄的天王星红外像（图 c，做了增强处理）上，高层大气的风暴和带结构以及（环绕天王星的）一组细环很明显，照片右边的云高于天王星的同温层，以每小时 500 千米的速度环流

时刻，因为他们最后一次清晰地看到土星是在 1981 年，当时旅行者 2 号探测器飞越土星并拍摄了照片。此后，哈勃空间望远镜一直是观测土星大气正在发生的变化主要空间仪器。但这种情况已经改变，卡西尼号飞船历经 4 年旅程，在 2004 年 7 月进入环绕土星的轨道，开始观测研究土星及其卫星和环系。

旅行者 2 号探测器分别在 1986 年和 1989 年飞越天王星和海王星并拍摄了它们的照片，这些照片表明它们也是气体巨行星。它们的结构跟木星和土星相似，也有以氢为主要成分的浓密大气，大气下面是（内部的）液态分子氢和氦的外层，但外层下面是冰混合物中间层（主要是水冰，可能还有其他形式的冰——氨冰和甲烷冰），其下是与地球大小相仿的岩石核。在旅行者 2 号探测器成功地完成探访外行星使命的 8 年后，天文学家开始了一项用哈勃空间望远镜观测天王星的计划。天王星的自转轴不是垂直于其轨道面，而是几乎倒在它的轨道面上；也就是说，天王星是“躺”在轨道面上自转。在绕太阳的轨道运动中，天王星的南半球和北半球交替地对向太阳，这就使得在轨道运动的一定时期内，它的一个极区比赤道区和其他区域受热多。正在进行中的天王星观测计划着重探测它的高空雾霾的季节变化，雾霾在极区形成并笼罩天王星。哈勃空间望远镜最近发现了约 20 个天王星大气云的新特征，表明天王星的大气变化是很活跃的。

在旅行者 2 号探测器飞越海王星期间，海王星因产生一些风暴而独具特色。

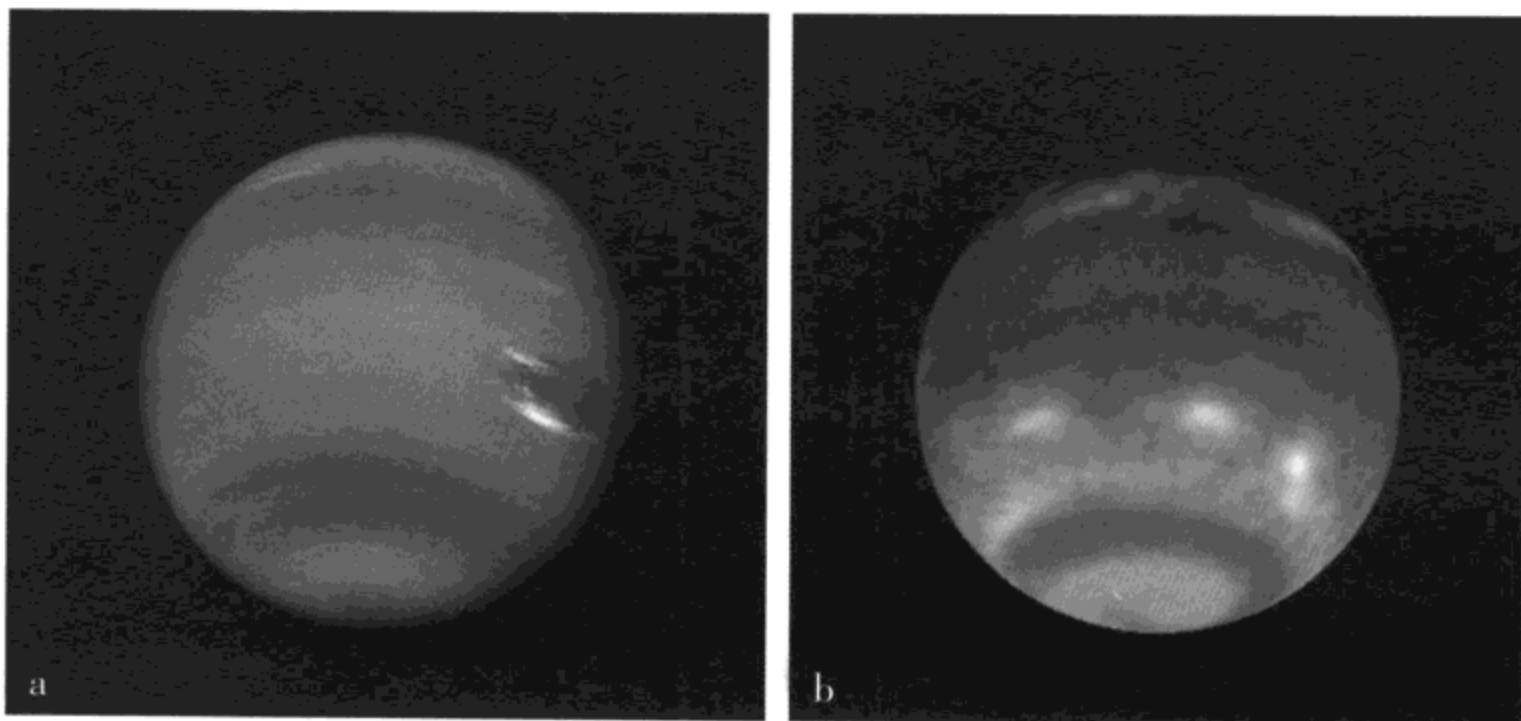


图 3.29 在旅行者号探测器对海王星进行拍摄时,海王星也被甲烷雾霾笼罩着,并且显示有一个类似木星大红斑的巨大风暴——大暗斑(图 a)。发现大暗斑几年后,科学家在用哈勃空间望远镜观测海王星时,却找不到大暗斑了。大暗斑的消失向科学家提出了一系列有关海王星大气条件的问题。哈勃空间望远镜和地面望远镜的红外联合观测显示海王星高层大气有带状结构(图 b)。

这些风暴横扫海王星视面,风速高达每秒 325 米。跟风暴一起出现的是一系列高空类似卷云的云,这是海王星有别于其近邻——天王星的地方。在最近对海王星的研究中,科学家们同时使用哈勃空间望远镜和夏威夷(美国宇航局的)红外望远镜进行观测。海王星的天气仍然很恶劣,到处狂风怒吼,新的风暴不断产生,赤道风的风速高达每小时 1450 千米。没有人很肯定地知道是什么原因产生了这些超音速的狂风和横扫海王星表面的巨大风暴,可能是由于跟遥远的暗淡的太阳的某种相互作用和一些在海王星深层进行的某些活动。无论如何,它使风暴形成和消失,而不是像木星的风暴那样持续几十年或几世纪。但是,海王星的确具有与较大的气体巨行星所共有的一种结构特性——一系列平行于赤道流动的气候带。

小的星球世界和大的环系

行星的卫星和环系各有特色,从而成为科学家们着重研究的对象。在太阳系形成的大框架中,较小的星球世界占据有趣的演化位置。地球的卫星——月球,可能是由于刚形成的地球与一个火星般大小的撞击体发生撞击而形成的——撞击的抛出物很快集聚而形成环绕地球运行的月球。其他卫星,如火卫一和火卫二,则是被火星俘获的小行星。在外太阳系,很多大的冰卫星簇拥在气体巨行星周围,它们的大多数可能是在行星形成的同时形成的。其余卫星可能是较大天体受

图 3.30 火星的卫星——火卫二（图 a）、火卫一（图 b）都是很
小且形状奇特的，已
遭受过陨击。它们很
可能是被火星俘获的
小行星

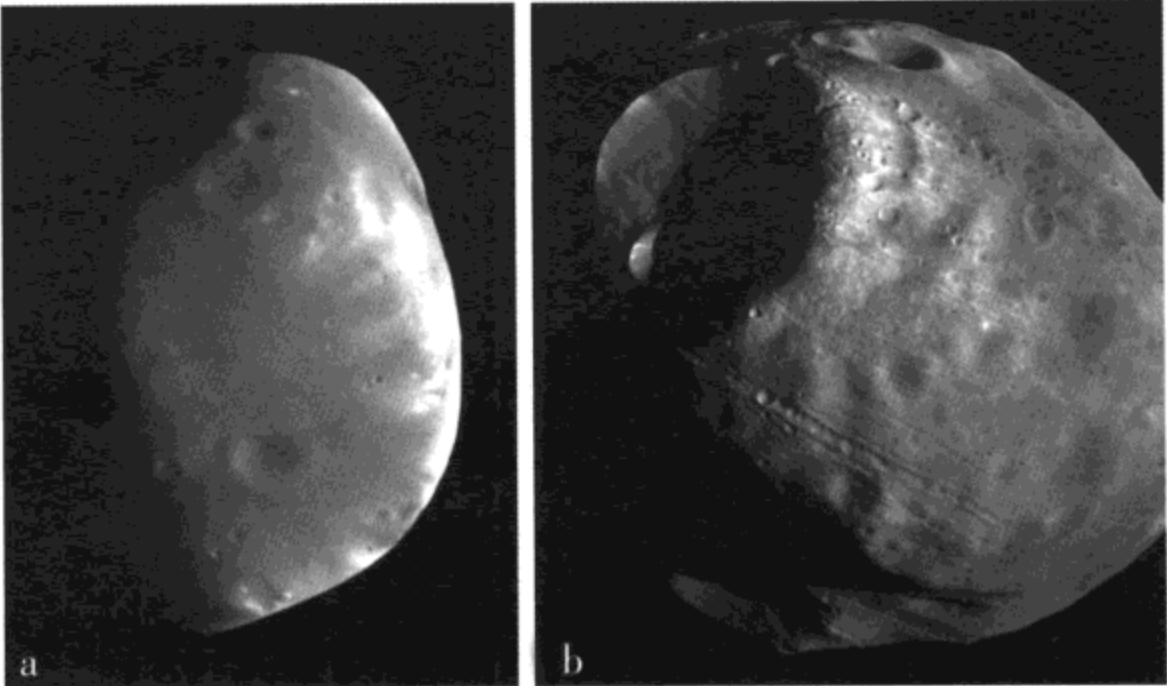
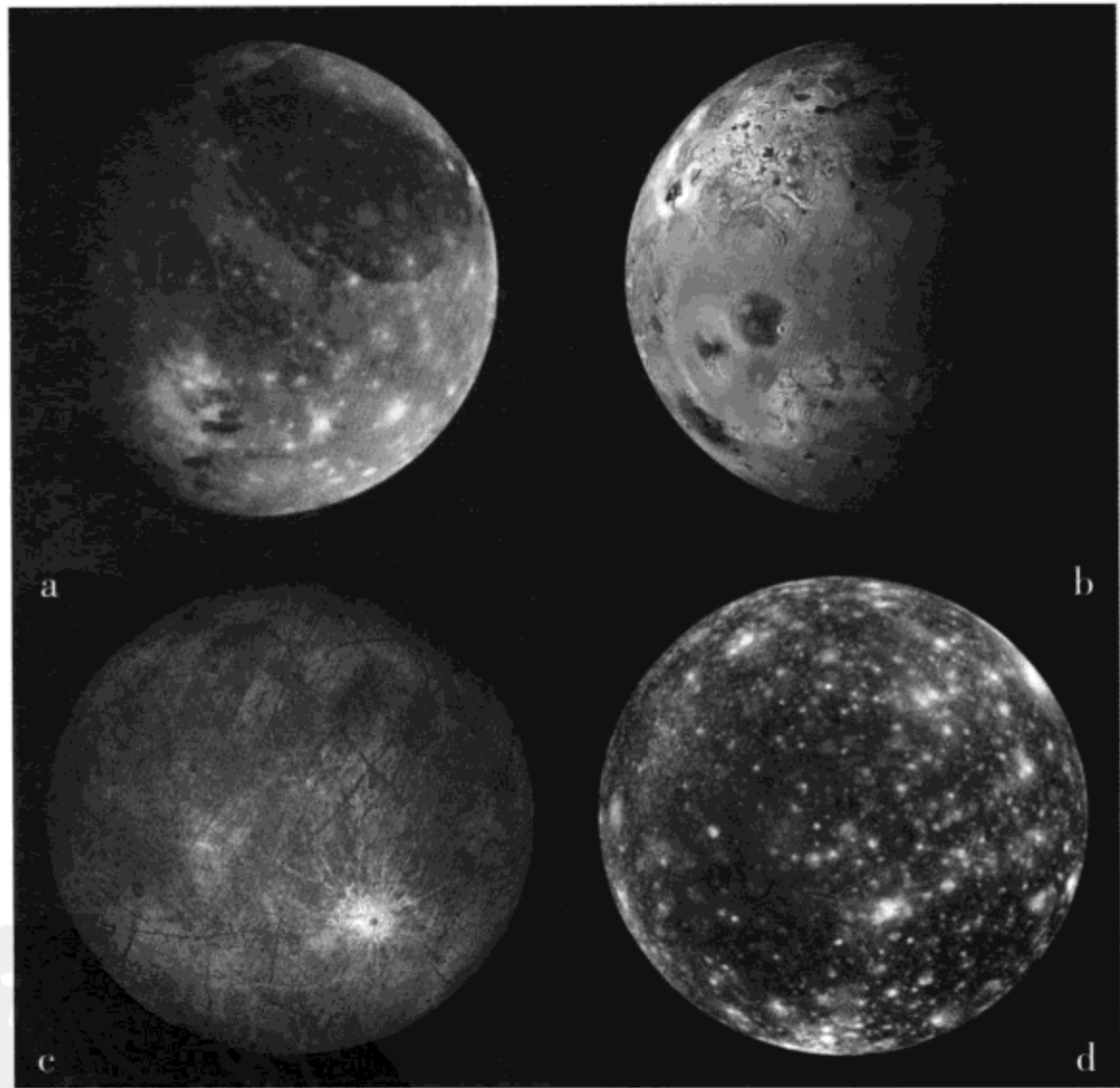


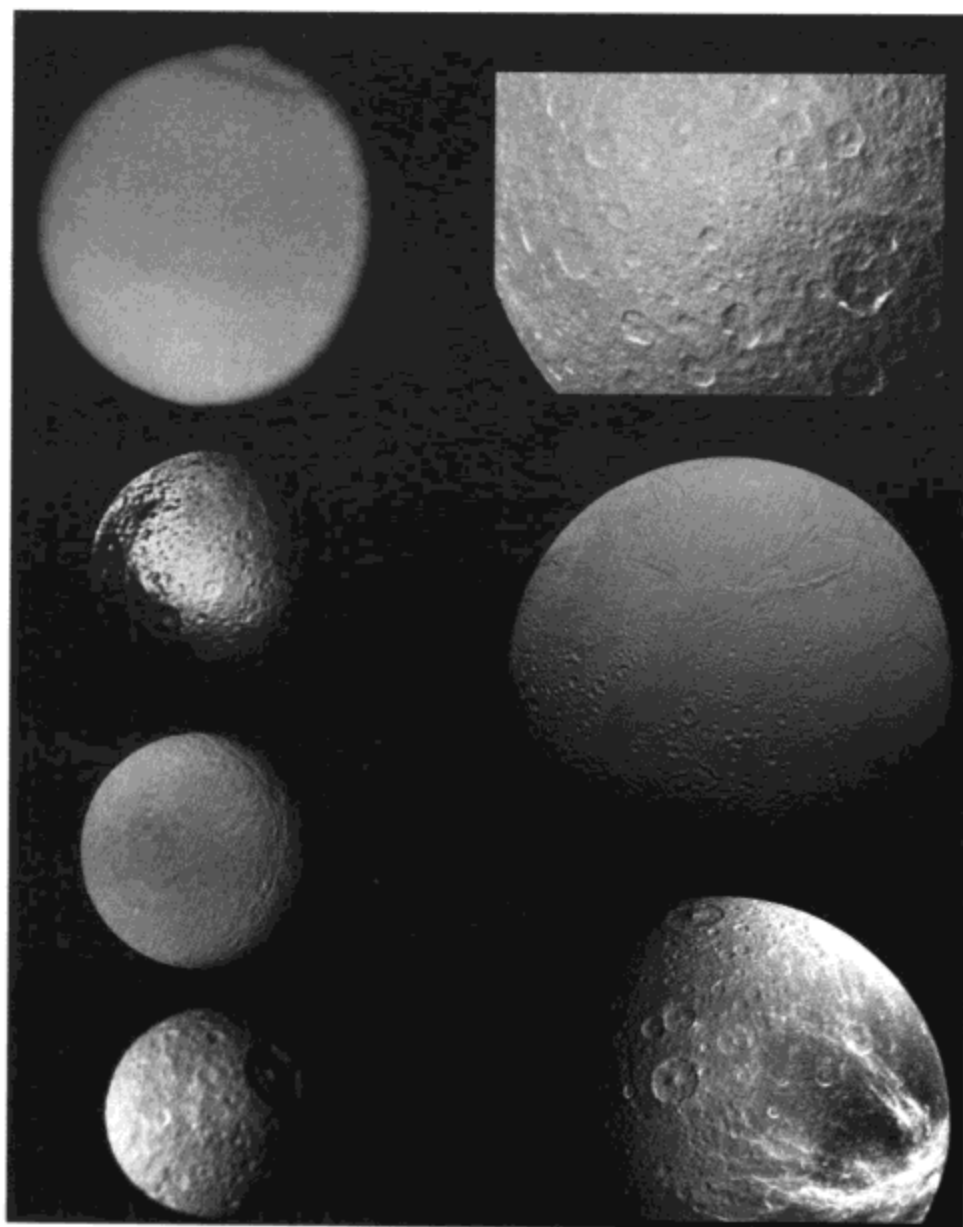
图 3.31 木星有 63 颗
卫星。伽利略号飞船曾
探访过木卫三（图 a）、
木卫一（图 b）、木卫二
（图 c）、木卫四（图
d）。在木卫二的照片
上，可以看到表面开裂
的一些细缝，它们可能
是由冰外壳破裂所致，
下面的泥泞水冰上涌到
缝中并冻结在表面。木
卫四已变暗的冰表面有
很多亮的新鲜冰疤痕，
它们是外来小天体撞击
溅射所致。在木卫四带
疤的表面下可能是含盐
的导电海洋。木卫三似
乎刚受过撞击，而它表
面的较古老区域显示了
遥远过去的某时一次巨
大撞击事件的遗迹。活
火山连续喷发的木卫一
正在进行表面改造



强引力作用而分裂的碎块，或被俘获的彗核（这些彗星来自太阳系边缘，在绕太阳运行时经过大行星附近而被俘获为卫星）。

如前面所讨论的，木卫一和木卫二是科学家着重观测的对象，因为它们有独特形式的火山活动。通过用哈勃空间望远镜观测，天文学家发现木卫二有分子氧

图 3.32 土星有 50 颗卫星在环绕它的轨道上运行，这是旅行者号探测器拍摄的几颗最大的土星卫星照片。左边从上到下依次是土卫六、土卫八、土卫三、土卫一（有星状陨击坑），右边从上到下依次是土卫五、土卫二、土卫四。土卫六有浓云遮住其表面，南半球似乎较亮，赤道附近有云带，一个暗圈似乎环绕北极，所有这些跟土卫六大气中的云环流有关，同时，高层雾霾（类似于有时笼罩地球部分表面的烟雾）遮盖着云层。这些冰卫星都有受过陨击和经历表面改造的证据，这吸引着科学家们去探讨它们下面的作用机制

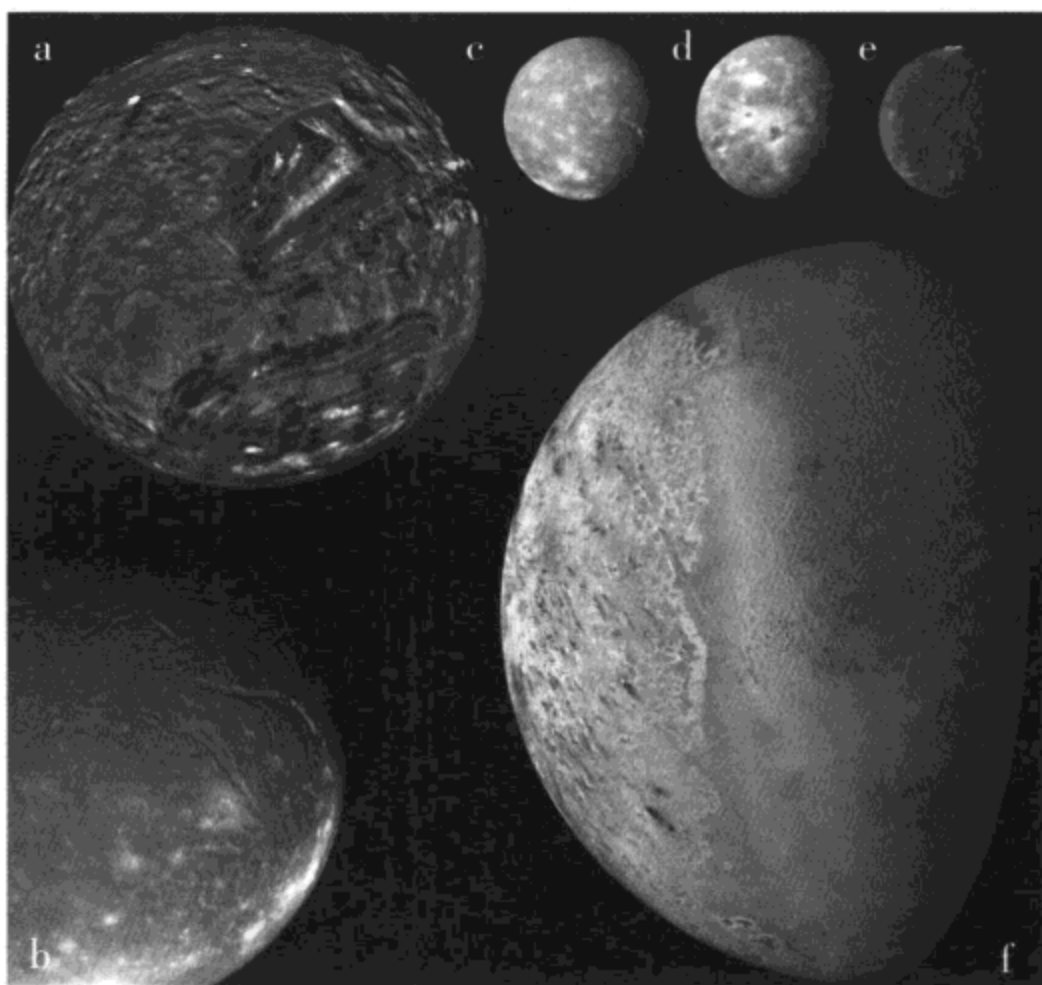


80 的稀疏大气。在地球上，存在氧就表明存在生命。但在木卫二上，氧的发现意味着某种非生物过程——可能意味着尘埃和带电粒子轰击水冰表面。来自这些过程的热量足以导致冻结的水冰融化，产生水蒸气和分子。一系列化学反应最终产生氢和氧，氢会逃逸到太空，氧经历累积而形成延伸到木卫二表面上空 200 千米的大气。对于多缝的木卫二的冰表面，科学家把哈勃空间望远镜观测与伽利略号飞船的实地观测相结合，去了解木卫二的内部结构和解答木卫二是否可能存在生命的问题。

伽利略号飞船拍摄了木卫四和木卫三的主要表面特征。陨击坑和一些类型的
81 亮的、暗的区域（称为反照率特征）清晰可见。此外，木卫四的前导半球似乎有某种形式的二氧化硫沉积。科学家推测这些沉积产生于木星磁层内带电粒子的碰撞。木卫四表面的新鲜冰表明，微陨石继续陨落，把木卫四的表面撞击为新鲜的冰粉末。

土星有 30 多颗卫星，包括 8 颗大卫星（译注：到 2005 年 11 月，已发现的

图 3.33 天王星和海王星的卫星都是冰的世界,有受过陨击、经历表面改造和间歇泉(冰火山)作用的痕迹。天卫五(图 a)的地形非常复杂,说明这颗卫星可能破碎和重新积聚过。天卫一(图 b)有巨大断裂带横过表面,还有很多陨击坑。天卫三(图 c)、天卫四(图 d)、天卫二(图 e)也都受过陨击,暗的天卫二有一个似乎很新鲜的冰环包围两极。海王星的最大卫星——海卫一(图 f)的地貌也非常复杂,包括所谓“哈密瓜地形”——照片中海卫一赤道附近的淡蓝色地带,暗纹是间歇泉——从冰壳下面喷出柱状物质



土星卫星总数已达 50 颗)。用我们的望远镜观察,这些卫星似乎像光点。土星的最大卫星是土卫六,它是在环绕土星的轨道上运行的最迷人的卫星。旅行者号探测器的观测表明,土卫六是甲烷云笼罩的世界。土卫六大气的主要成分是氮,还有少量甲烷,光化学的烟雾飘浮在它的大气高空。土卫六的寒冷温度使甲烷和乙烷保持气态和液态,而水冰则像岩石那样坚硬。

土卫六的浓云和雾霾使得旅行者号探测器看不到它的真实面目,科学家等待着哈勃空间望远镜安装第 2 代宽场行星照相机去拍摄这些浓云和雾霾下面的红外图像,因为土卫六的雾霾和浓云是红外透明的。通过第 2 代宽场行星照相机,科学家们可以对土卫六表面 576 千米宽的区域进行研究。土卫六的一个约 4000 千米宽(约澳大利亚那么大)的大的亮区代表某种固态表面区,其他的亮区、暗区 82 可能是大陆、海洋、陨击坑或不同类型的地形。

土星的其余卫星都是受过陨击、有裂隙的,且在一些地方覆盖暗物质——一位科学家称其为“复杂的有机粘性物”。这可能是表面冰被土星磁场中的带电粒子“暴雨般的轰击”所致。

土卫一被称为土星卫星中的“死星”,因为它像电影《星球大战》中的空间站。一个巨大的陨击坑几乎占其表面的 1/3。假如造成此坑的撞击体更大些,土卫一就会被撞碎,而碎块将散布于环系!

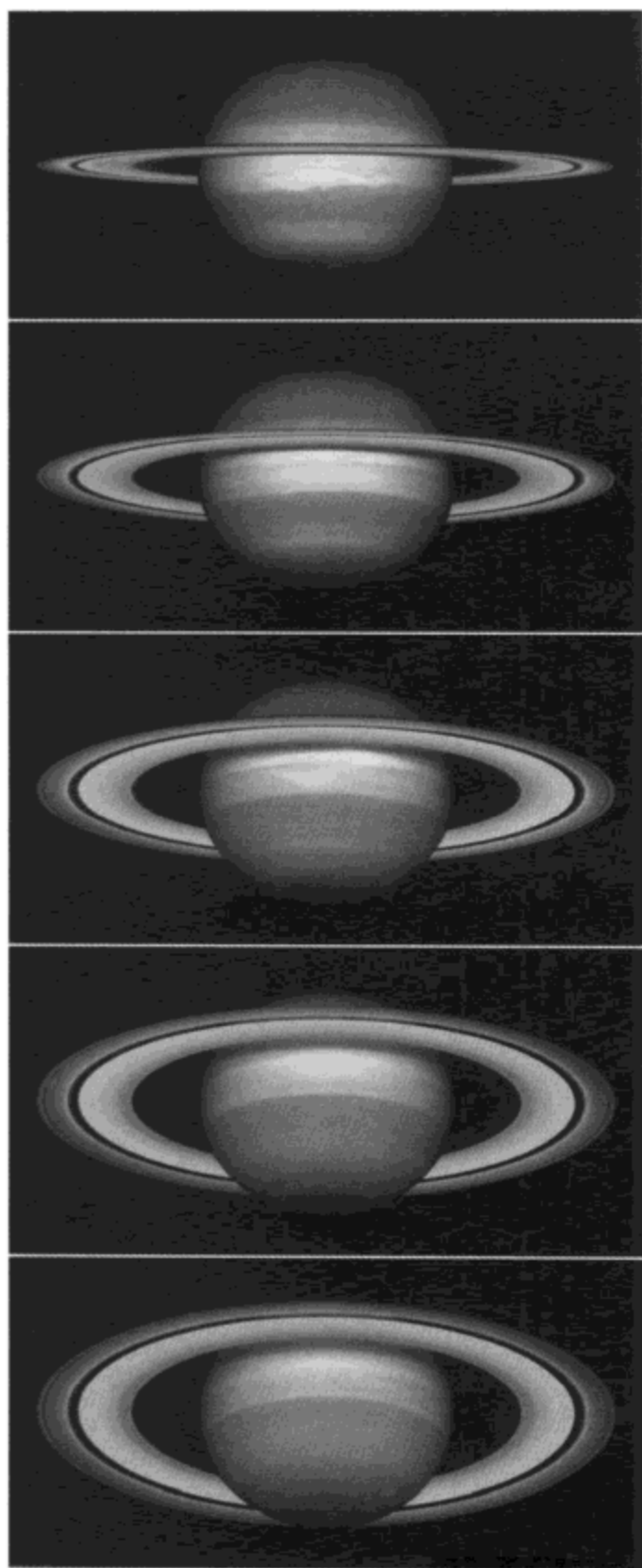


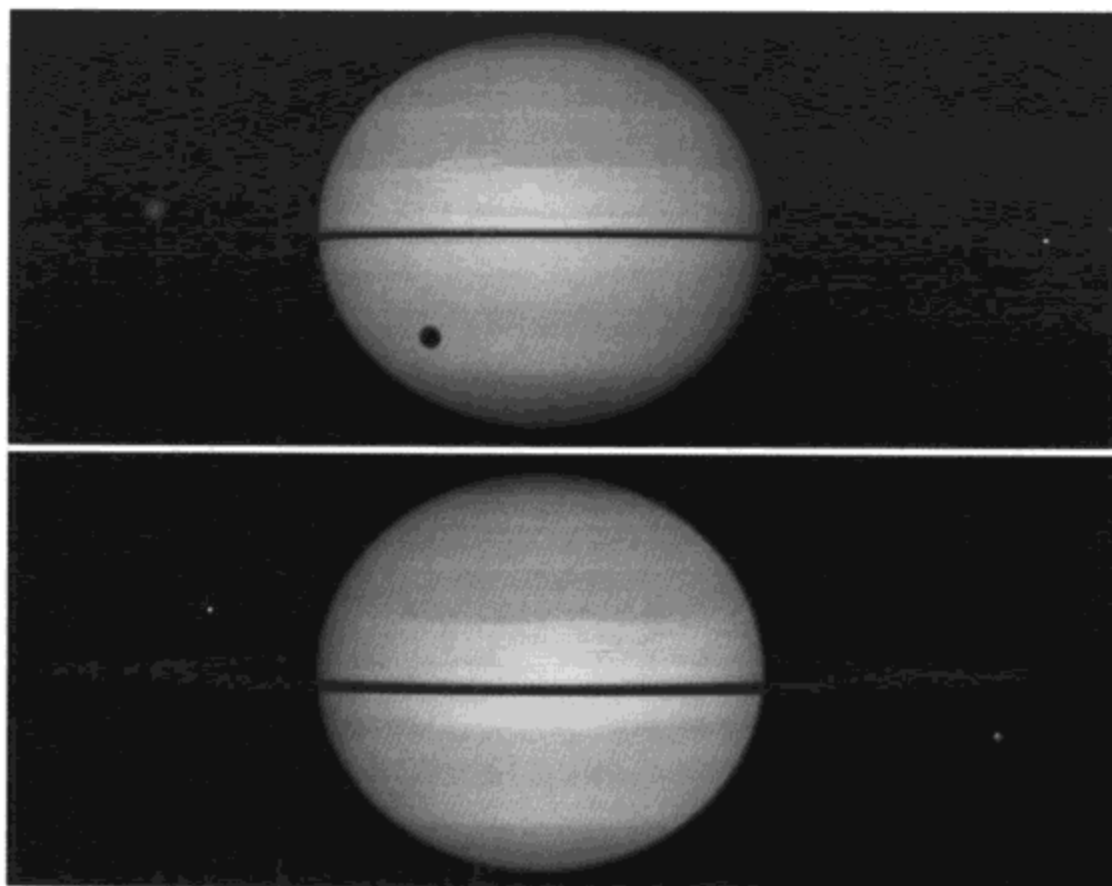
图 3.34 哈勃空间望远镜在 1996~2000 年拍摄的土星及其环系的系列照片，显示了土星环系以不同角度面向我们的变化情景：土星北半球从秋到冬，环系从刚过侧向到几乎面向我们。土星的赤道面对其轨道面的倾角为 27° ，这与地球的赤道-黄道（轨道）的交角为 23° 不同。土星在其轨道上 30 年绕太阳转一圈的过程中，它的一个半球先斜向太阳，然后另一半球斜向太阳。正如地球的季节变化一样，这样的循环变化导致土星的季节变化。第一张照片摄于土星北半球秋分后不久（南半球春分也如此），最后一张摄于倾斜接近最大时或北半球冬至（南半球夏至）时

土星的其余卫星似乎都是寒冷的冰世界。旅行者 2 号探测器所摄的图片表明，它们的表面受过陨击、有裂隙，且某种程度地有暗的物质污迹。卡西尼号飞船将用较多时间来考察这些令人着迷的暗的物质污迹。非常遗憾的是现在还没有计划派后续飞船去探测天王星、海王星的冰卫星，因为它们之中有更多的不平常的卫星。天王星有 5 个冰卫星和一系列小卫星有待研究。较大的天王星卫星有天卫一、天卫二、天卫三、天卫四、天卫五，像木星轨道之外的其他冰天体那样，它们的表面也布满陨击坑。由于重力的应力作用于易碎的冰壳，这些卫星的表面有裂隙。天卫一是这些卫星中最亮的，而天卫二是最暗的。天卫三表面散布着大峡谷，天卫五表面的地形复杂，看起来地质活动很活跃。天卫四是这 5 颗卫星中离天王星最远的，它跟天卫二类似，看似覆盖着烟尘。

说到海王星的卫星，也不乏趣闻。如前面已谈过的，海卫一的表面有间歇泉（冰火山），这些由氮和其他气体组成的喷泉直冲稀薄的大气。海卫一表面有很多奇特的斑点，用旅行者号探测器项目组的一位专家的话来说，有点像哈密瓜皮。

除了有卫星之外，气体巨行星还有延展的环系。太阳系最美丽的景观就是土星的光环。自从伽利略第一次用望远镜观测到土星两旁有附属物以来，天文学家

图 3.35 哈勃空间望远镜在几乎看不到土星环系时所拍的照片。通常，天文学家是在土星环系倾斜时进行观测。当地球几乎处于土星环系平面上时，环系就侧向我们，上面一幅照片就是在这种情况下拍摄的，摄于 1995 年 8 月。土星的最大卫星——土卫六在土星上投下影子，土卫六的大气有暗的棕色雾霾。另一颗卫星是白色的，因为它有亮的冰表面。上图右侧 4 颗卫星从左到右分别是土卫一、土卫三、土卫十、土卫二。环系也在土星上投下影子。下面一幅照片是在几个月之后，于 1995 年 11 月拍摄的，环系略倾斜，土卫四在右下，土卫三在左上

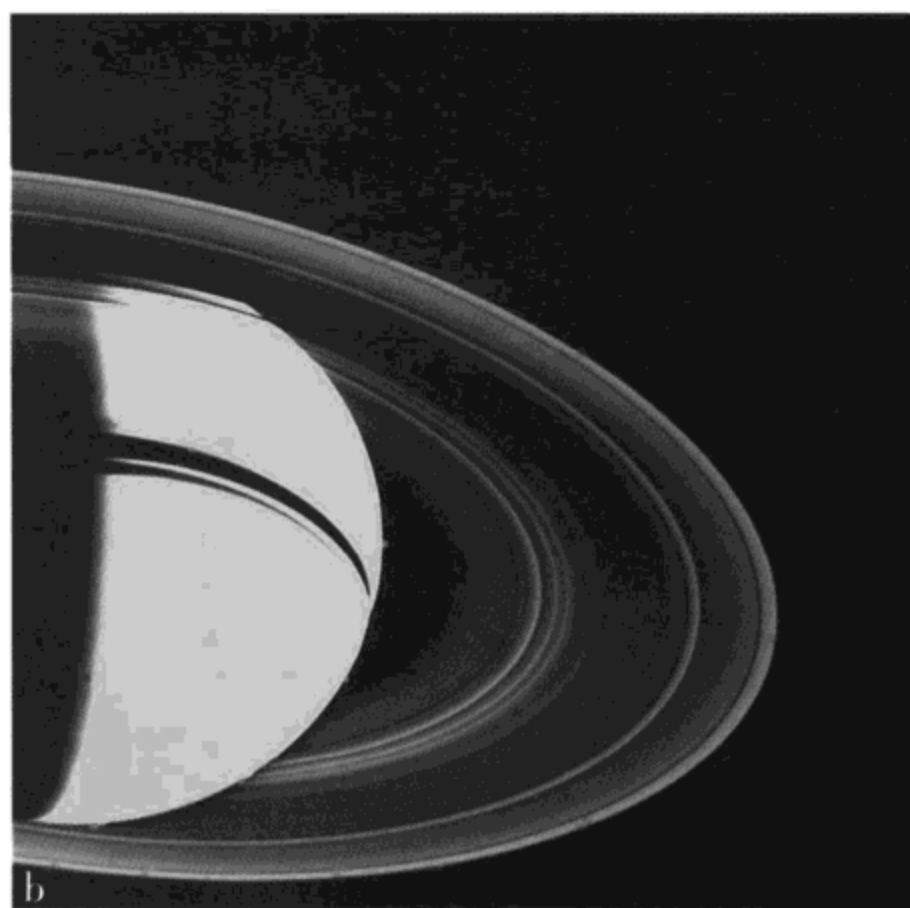
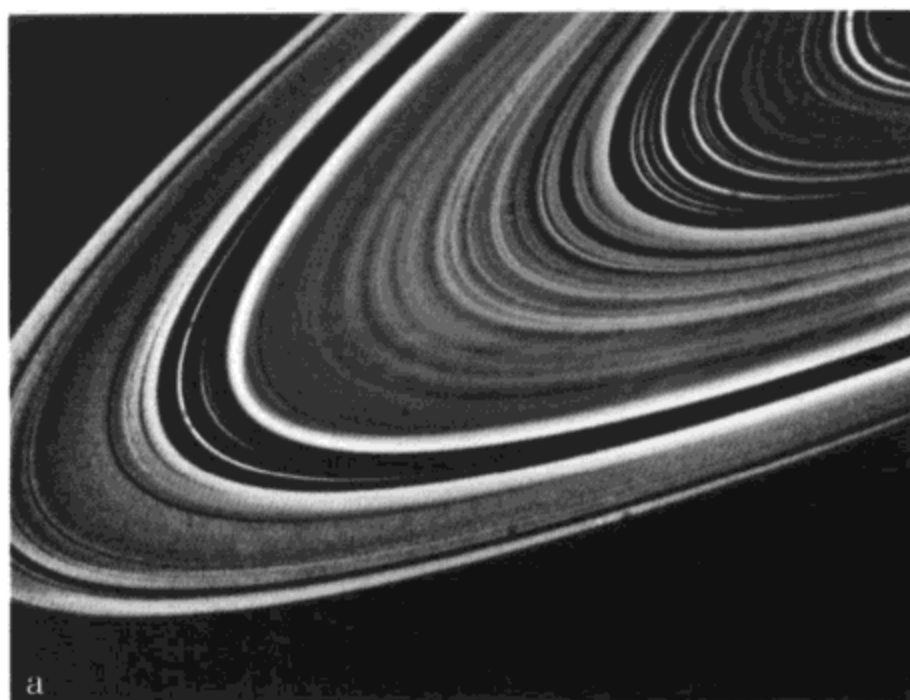


们用地面望远镜很容易看见土星的环系。起初，土星环系让伽利略感到迷惑，由于受望远镜分辨力不够的限制，他将环系描述为“圆盘”（土星）上的两个大把手，像是两只“耳朵”。的确，环系的真实性质让天文学家猜测了好些年。环是一个固体整体还是由粒子组成的？环转动吗？如果旋转，转动有多快？如果环是固体的，那么旋转时如何保持在一起？

也许令伽利略意料不到的是，他发现的土星光环成为了对其他气体巨行星的一种检验标准。现今，环系的很多研究集中在产生环系的起始动力。一些科学家猜测，地球本身在形成早期也应有一个环系，它可能是地球在形成过程中吸积的星云物质，或较小星子游荡到接近地球时被引潮力瓦解而形成。关于土星环系的物质来源有两种理论：或者一颗较大的卫星运行到很接近土星而被土星的引力撕碎，或者是在最初没能结合而形成土星卫星的颗粒物质。不管环系是如何形成的，环系（和约束环结构的环内卫星）都是美丽的景观。

虽然用地面望远镜拍摄土星的环系已有多年，但旅行者 2 号探测器拍摄的照片最清晰。通过旅行者 2 号探测器所拍摄的几十幅高分辨照片，天文学家第一次了解到，土星主环实际上是由成千上万个细环组成的，甚至像卡西尼环缝和恩克环缝那样看似空的区域也含有微弱细环。这些环的主要块体是大小从几厘米到几米的冰块。环系的大量物质散布在土星赤道外面数十万千米的空间，环的厚度从

图 3.36 旅行者 2 号探测器拍摄的土星环系伪彩像 (图 a) 显示了环系的复杂结构。为了得到这幅伪彩像, 科学家利用特制滤光片进行拍摄, 以便显示环系的各组成部分的化学成分的不同。旅行者号探测器告别土星, 在离土星 340 万千米时拍摄的图像 (图 b) 显示土星的一个半球处于黑夜



10 米到 1000 千米不等。

旅行者号探测器也揭示了土星环系本身的一些有趣结构。首先, 环系不是正圆形的, 而某些较窄环似乎彼此编成辫子。必然有某种原因形成这些扭曲、交织的椭圆环, 但到底是什么呢? 原来是“牧羊卫星”, 它们刚好在各环之外的轨道上运行, 驱使环的粒子像羊群那样奔跑。

土星环系是 1995 年关注的焦点, 因为土星每 15 年就发生一次“环面”侧向地球的现象。由于土星和地球各自在自己的轨道上绕太阳公转, 所以存在土星环系侧向地球的时间周期。除了

对穿过土星环的星光进行测量以外, 行星科学家们还想用哈勃空间望远镜的高分辨照相机观测土星环的厚度, 研究土星大气, 寻找在环内的已知卫星和发现旅行者 1 号探测器、旅行者 2 号探测器未见到的卫星。1995 年 5 月 22 日, 科学家拍到了土星的 4 颗新卫星的图片, 它们在偏心的 F 环附近的轨道上绕土星回转。虽然一般仅把较大的粒子称为卫星, 但从理论上说, 土星环系的所有粒子都可以被认为是“卫星”。

环系不是土星独有的奇观, 木星、天王星和海王星都有环系环绕。木星的环

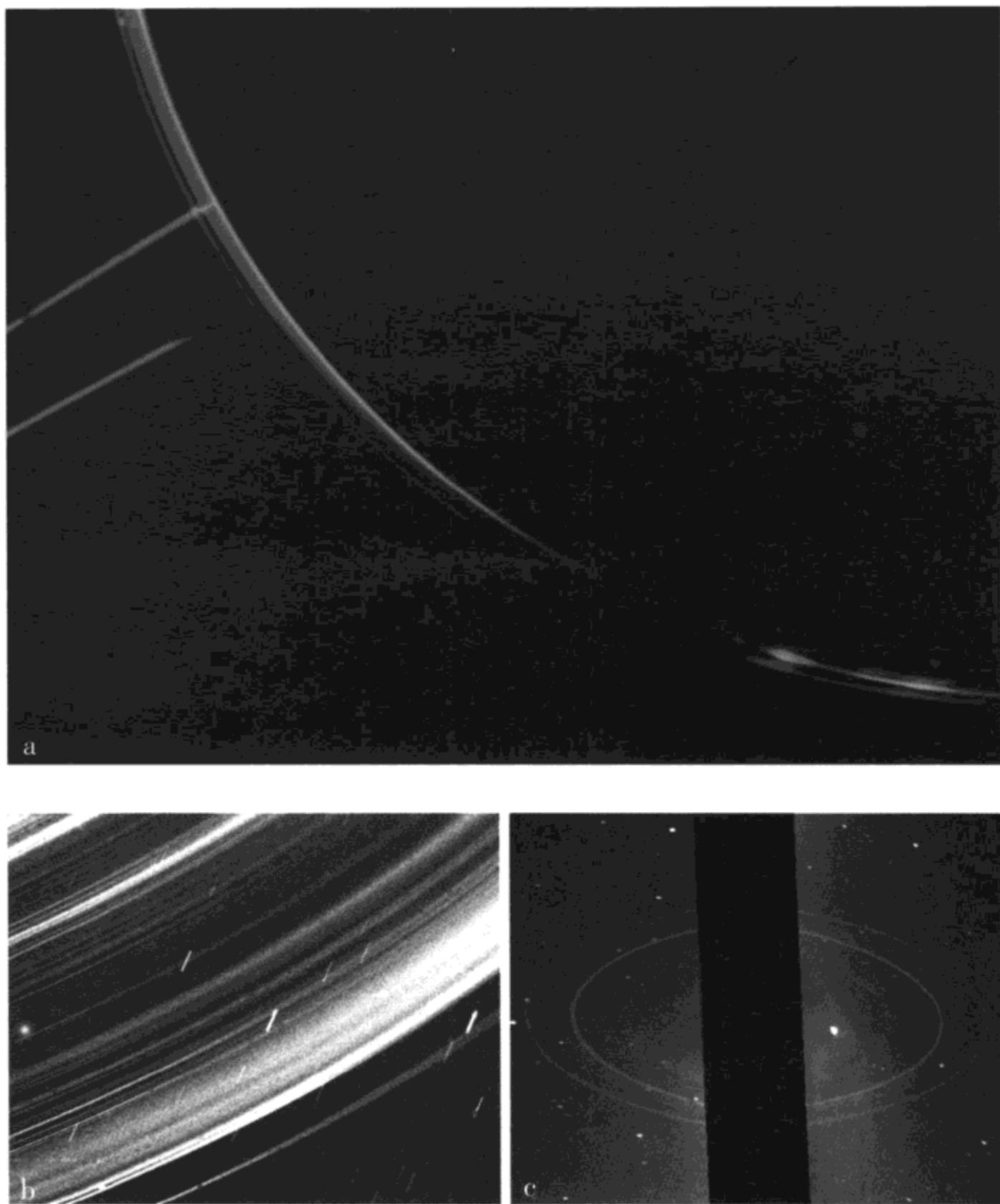


图 3.37 图 a 为旅行者 2 号探测器从木星黑夜一侧拍摄到的薄的木星环系,仅可见到木星的边缘,而环系是从木星向外延伸的两段弧。图 b 和图 c 分别是旅行者 2 号探测器拍摄的天王星环系和海王星环系

系很薄,可能大多由尘埃组成。它是在旅行者 2 号探测器所摄的一幅图片上被发现的,后来由伽利略号飞船进行了细致的测绘。木星的环系可分为 3 部分:最大的是主环——约 7000 千米宽的尘埃带,它向外延伸,超过木卫十五和木卫十六的轨道而突然终止于离木星中心 129000 千米处;在主环内界有环晕,这是一个厚度约为 20000 千米、很暗的圆环,从主环向木星云顶延伸;主环外侧是一对暗

的薄环，以木卫五和木卫十四为界。

天王星和海王星的环系由冰块组成，混杂着宽的尘埃带。天王星环系的较大粒子是极暗的，研究者认为它们附着有暗的碳类物质。

冥王星是怎样的世界

冥王星是太阳系的第九颗大行星，它是因太远而唯一没有被飞船探访过的行星。冥王星被认为是有些“怪异”的世界，它有一颗与自己差别不太悬殊的卫星（冥卫一），因此人们常把它们合称为“双行星”。近年来也有一种观点认为冥王星比其余八大行星小很多，所以应取消它的大行星资格。冥王星确实比一些卫星还小，但由于它是处于海王星轨道之外的柯伊伯带的最大成员，因此最近被称为“柯伊伯带天体之王”。

冥王星确实有点非同一般。冥王星离太阳的平均距离为 59 亿千米，它绕太阳公转的轨道是很扁的椭圆，而且轨道面对黄道面（地球轨道面）的倾角也很大。冥王星的“1 年”（即公转一圈的时间）为 248 个地球年，从汤博（Clyde Tombaugh）在 1930 年发现它直到现在，还远没有过一个“冥王星年”。冥王星的伴星——冥卫一在半径 20000 千米的轨道上每 6.4 天绕冥王星转一圈。冥王星的直径（2300 千米）约为冥卫一直径（1200 千米）的 2 倍。

哈勃空间望远镜观测了这对遥远的双行星，最近地面望远镜又拍摄到了它们几幅珍贵的图片。哈勃空间望远镜在 1994 年中期拍摄到冥王星的大部分表面，陨击坑或陨击盆地可能造成了冥王星表面的明暗特征，然而，更可能是冥王星冻结的氮-甲烷稀疏大气和沉积的冰霜使得冥王星的表面呈现复杂图案。冥王星上的冬季长达 60（地球）年，更多的大气凝结为表面上的霜，这使得冥王星表面的图案更加明显。

因为冥王星是如此遥远，因此在 1979 年发现冥卫一之前，没有人想到它会有卫星。直到 1990 年哈勃空间望远镜拍摄冥王星和冥卫一的高分辨图片，天文学家才能够清晰地分开这对“双行星”。有了哈勃空间望远镜和新一代地面自适应光学望远镜，天文学家就能够准确测定冥王星和冥卫一相互绕转的轨道，从而修正对这两个遥远世界的质量和密度的估计。天文学家认为，冥王星有 60% 是岩石，然而冥卫一的大部分是冰。

一些天文学家提出这样的问题：冥王星-冥卫一这对双行星是一起演化，还是在太阳系形成时的特殊环境下被抛到一起的？它们很可能是与原始星云外边缘的其他类似的“行星胚胎”一起产生的。其他的胚胎或者用于形成气体巨行星，



图 3.38 冥王星和冥卫一的 4 幅红外照片。这是采用自适应光学技术增加明锐度的地面“双子座” (Gemini) 望远镜经过连续几夜的拍摄而得到的

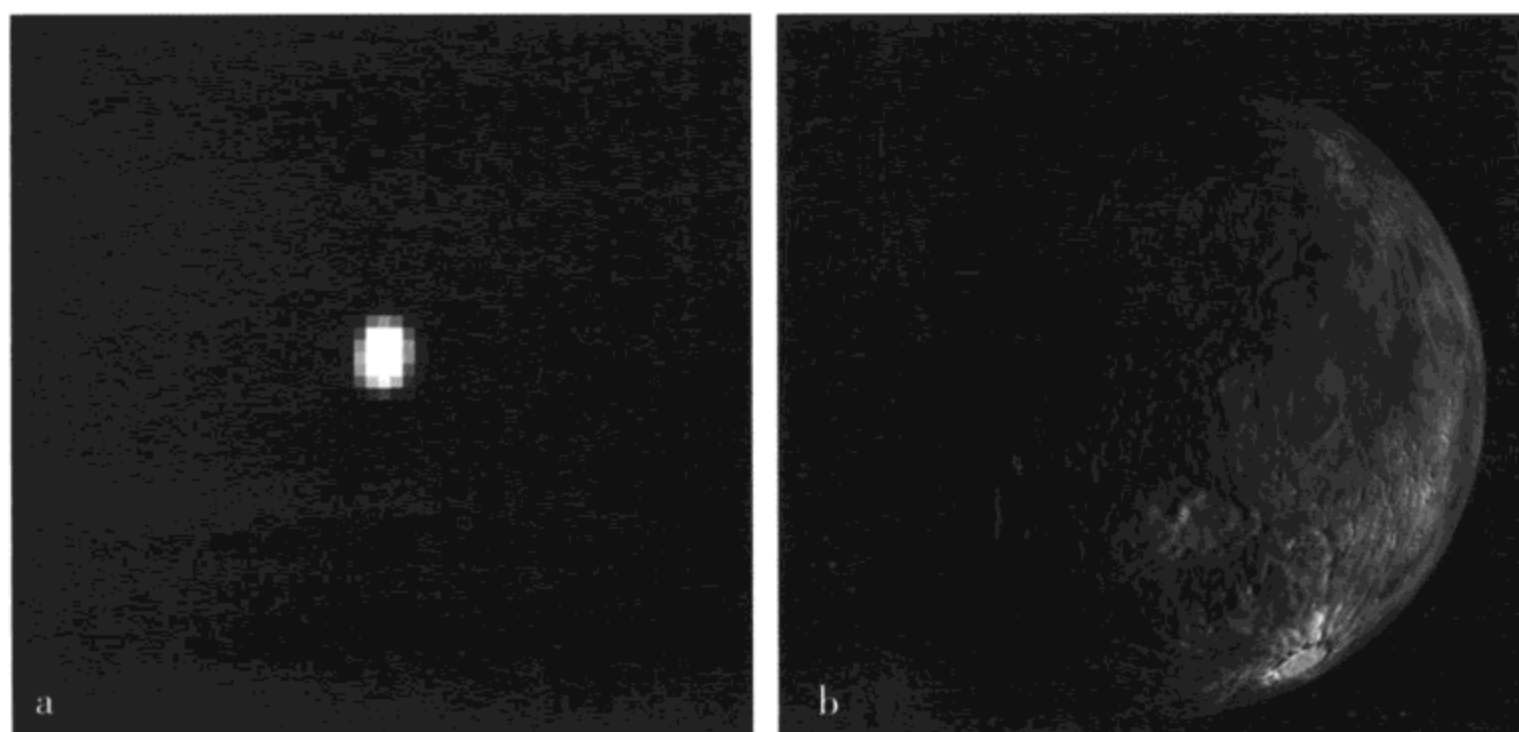


图 3.39 自冥王星被发现以来，夸奥艾尔是最先在太阳系最外部被发现的大天体，这个冰球世界约为冥王星直径的一半，比冥王星远 15 亿千米。它们都位于柯伊伯带，这是一个从海王星轨道向外延展几十亿千米的类彗星天体所在的带。这是哈勃空间望远镜捕获到的遥远的夸奥艾尔的照片 (图 a)，一位太空艺术家激情地把它绘为有疤痕和变暗表面的冰球世界 (图 b)

或者被驱逐出星云，冥王星和冥卫一可能是仅有的大的遗留物。如果果真如此，⁸⁷那么把冥王星称为“柯伊伯带天体之王”的意义与把冥王星称为第九大行星的意义一样重要。

很多柯伊伯带天体是在冥王星轨道之外发现的，其中早时发现的最大的的是夸奥艾尔 (Quaoar) [译注：2005 年发现了冥王星还有两颗小卫星，一颗约 50 千米大，另一颗更小，它们分别在半径 4.9 万千米和 6.4 万千米的圆轨道上绕冥王星转动。2005 年初，宣布确认一颗比冥王星还大的柯伊伯带天体 2003 UB313 (浑号 Xena)，它在扁的椭圆轨道上每 560 年绕太阳公转一圈，有些人称它为第

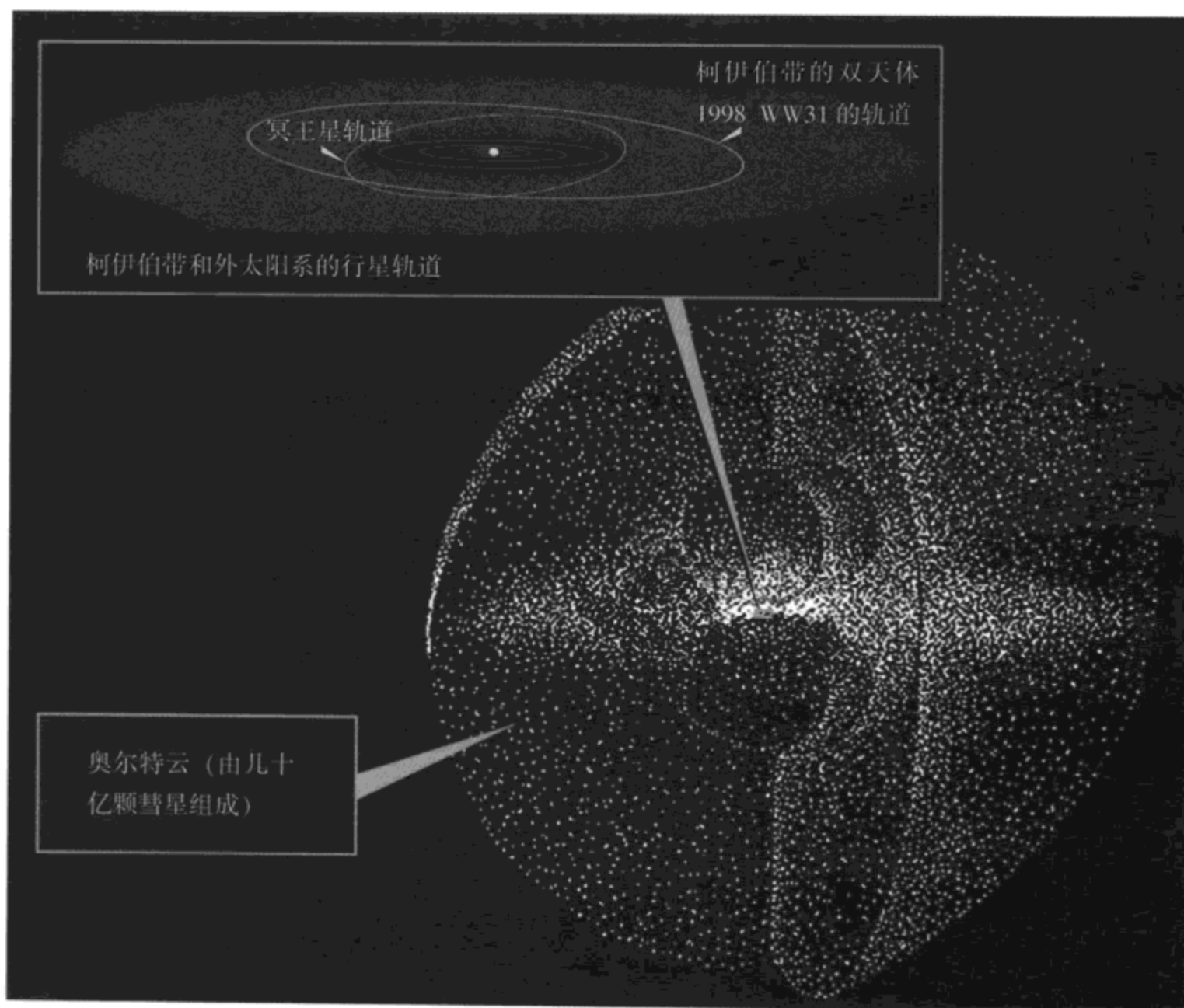


图 3.40 包围着太阳系的奥尔特云图示。有大量的冰天体的柯伊伯带从海王星轨道沿太阳系平面向外延伸，被奥尔特云包围。天文学家在柯伊伯带有几个最新发现，如夸奥艾尔和 1998 WW31（似乎还有伴星）

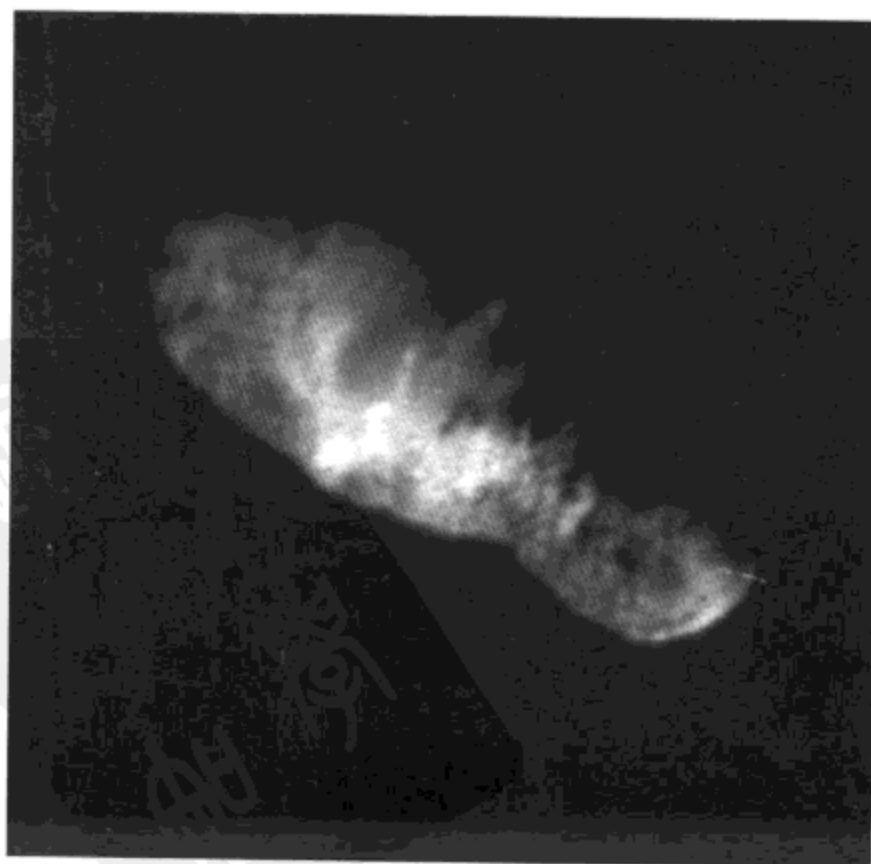


图 3.41 2001 年 9 月，深空 1 号探测器在距离彗核 2200 千米的地方飞越波瑞利彗星 (Borrelly, 其慧核长约 8 千米)，发现它表面的地形比预料的崎岖，深的断裂和暗的表面物质分布在起伏不大的平原上

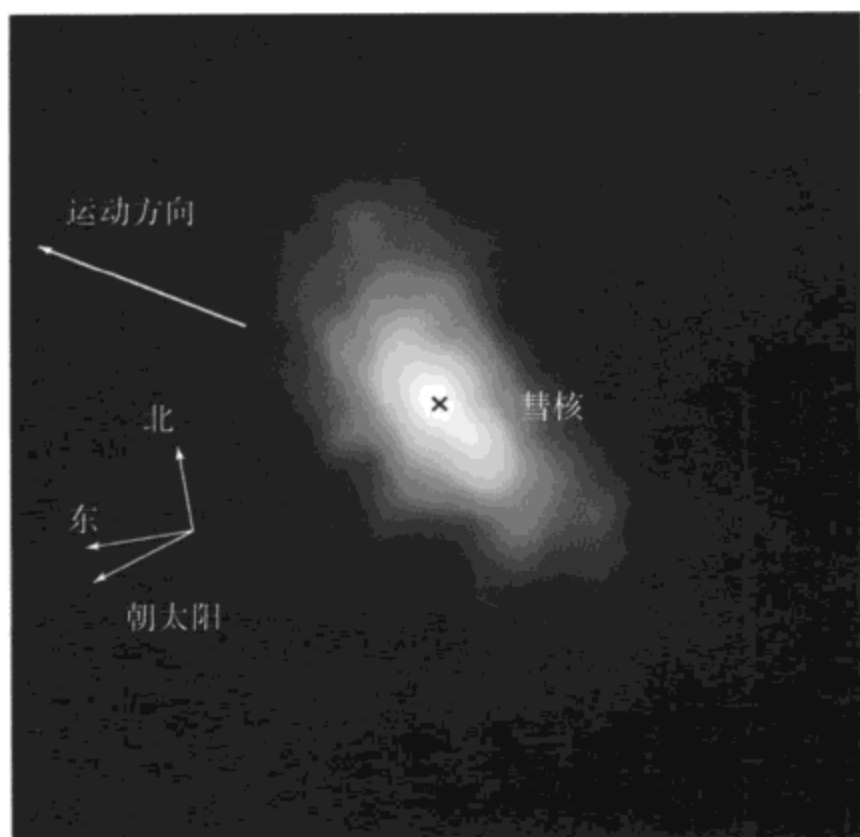


图 3.42 2000 年 7 月 14 日，钱德拉 X 射线天文台拍摄到彗核周围的彗发中的氧离子和氮离子发出的 X 射线

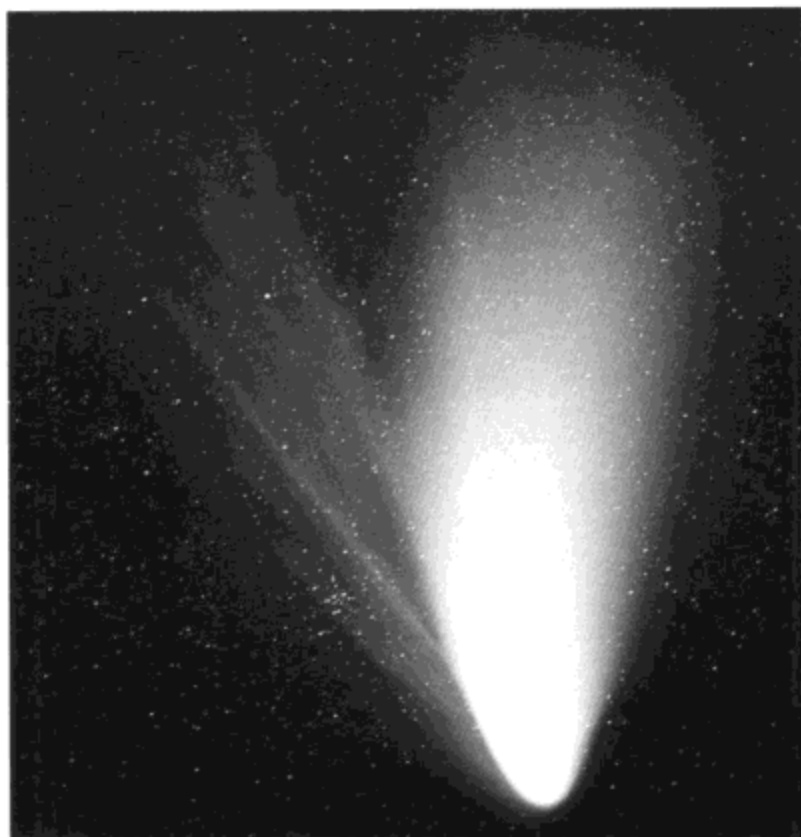


图 3.43 海尔-波普彗星 (C/1995 O1, 由阿兰·海尔和汤姆·波普发现) 是近年发现的最特殊的彗星之一，它来自遥远的太阳系边缘，上次出现在地球上空是在 4200 年以前。它的轨道在变化，下次旅行到地球附近将在 2300 年以后。海尔-波普彗星是彗星研究者和业余天文学爱好者的宠儿，它在 1996 年回归的几个内，呈现明亮的尘埃彗尾（图片中的白色，很宽）和很强的等离子体彗尾（图中的蓝绿色，向左流出）

十大行星]。它离地球 64 亿千米，大小约为冥王星的一半，它的体积相当于所有小行星的总和，可能大部分是冰和岩石（这一点与大彗星相似）。将来飞船探访冥王星和柯伊伯带的时候，可以更多地揭示这些冰天体和它们起源的奥秘。在那之前，天文学家继续用哈勃空间望远镜和地面仪器观测冥王星，这将为近距离观测冥王星和冥卫一提供丰富的信息。

彗星：太阳系的风向标

在遥远的太阳系外部，几乎全部是彗星漫游的园地，但这些彗星最终会踏上进入内太阳系之路。当彗星冒险走近太阳，它们就会成为星空观测者常年关注的宠儿。对彗星进行研究分析是我们寻找太阳系演变过程的正确答案的一种很好的方式，因为在小的冰-尘天体沿扁长椭圆走近又远离太阳的过程中，经历了令人惊异的形态变化。这些冰天体的大多数被困在外太阳系寒冷的奥尔特云和柯伊伯带中，度过了漫长的岁月。由于它们是与太阳系的其他天体同时形成的，含有行星形成时（45 亿年前）普遍存在的化学混合物，因此通过对它们进行分析研究，我们就能了解太阳系的过去。奥尔特云是长周期彗星的主要来源，而柯伊伯带似乎是短周期彗星的主要来源。只有彗星从外太阳系的轨道被曳到内太阳系较温暖的区域，它们才

受热，它们的冰才会升华（很像干冰升华那样）。当彗星发生升华时，就放出水蒸气、二氧化碳、一氧化碳和很多别的气体。这些气体是研究彗星成分的线索。

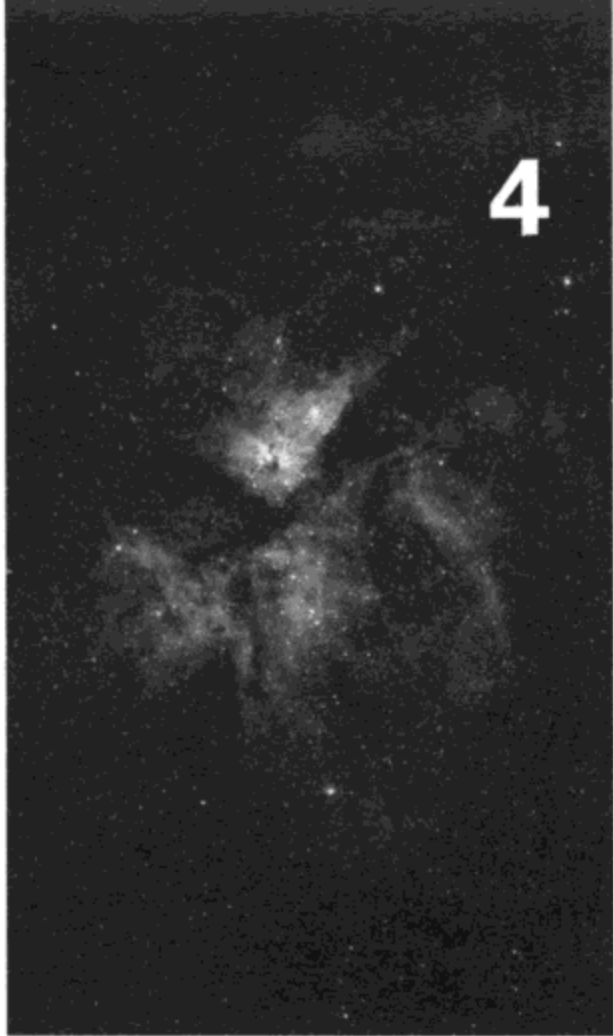
彗星的主体或本体是不大（几千米）的彗核。以前很难直接观测到彗核，因而彗核情况是个谜。直到1986年3月，乔托（Gioto）号探测器第一次飞近哈雷彗星才拍摄到彗核的真面貌。哈雷彗星的彗核是长16千米、宽8千米的“烤山芋”，表面暗黑、凸凹不平，几个局部区发出喷流，从表面冰升华气体并带出尘粒而形成彗星大气——彗发和彗尾。最近，深空1号探测器飞越波瑞利（Borrelly）彗星，拍摄到它的瓶子形彗核。[译者注：2004年初，星光号飞船探访了威尔德2号（Wild 2）彗核。2005年7月，深度撞击号飞船发射的撞击弹打中坦普尔1号（Tempel 1）彗核，收集的彗核样品已带回地球。]

许多彗星长出一对彗尾。一条是尘埃组成的，我们通常看到它反射太阳的黄白光，称为尘埃彗尾；另一条通常在蓝光下看得更清楚，主要由彗星流出的带电粒子组成，称为等离子体彗尾，它常顺着与太阳风耦合的磁力线方向延展。事实上，等离子体彗尾很久就以“太阳的风向标”而著称，因为它能够反映所经受的太阳风环境的性质。

直到不久前，除了发光的等离子体彗尾和亮的尘埃彗尾之外，没有人预料到彗星还有更令人惊叹的高能现象，因为没有人想到在X射线波段观测彗星。在宇宙中的一些高能过程（诸如超新星爆发、进入黑洞时的物质湮灭）中，一般都放出X射线。然而，天文学家却观测到了百武彗星发出的X射线。然后，天文家用钱德拉X射线天文台观测林诺彗星（Linear, C/1999S4），证实它发出X射线。似乎彗星一直都发射X射线。在太阳风的吹拂下，来自太阳的带电粒子（离子）向彗星吹过去，从彗核周围气体云的分子吸引电子。在这一过程中，离子和分子交换电荷，因而在科学家没有预料的地方产生X射线。

如我们在本章开始时所说的，天文学的探索永无止境，任何时候我们都不应骄傲自满。当我们偶然发现木卫一上喷发的火山或彗星的X射线，或干燥和多尘的火星上存在水的证据的时候，我们得到和面对一个警示：我们在宇宙中的地位微不足道！正当我们认为自己了解了一件事物而沾沾自喜时，宇宙又会嘲讽般地滋生出新问题，向自以为是的我们提出新的挑战。在宇宙的每个角落，存在着比我们所知道的多得多的事物！在下一章，我们的太空之旅将走出仍让我们激动和迷惑的太阳系，去看一看恒星世界是否也会让我们惊诧！

4 恒星的生平



星空就是我们头顶上最遥远的艺术陈列馆。

——爱默生 (Ralph Waldo Emerson)

我们所拥有的最古老画册就是子夜的星空。

——毛恩德尔 (E. W. Maunder)

从舒适、温暖的行星——地球上仰望星空并探索恒星和星系的奥秘，这是以无法衡量的方式改变个人生活的活动。在我们中间，只有以自我为中心思想最严重的人才不会为星空的美妙所感动。星辰曾经满足过人类的各种需要，包括政治的、宗教的、科学等方面的需要。然而，如果我们要了解我们生存在其中的宇宙，只有科学才是真正的事业。

恒星经历极其漫长的生存和死亡过程，即使寿命最长的人的一生相对这一过程而言也仅是短短一瞬间。恒星，这种自身发光的气体球，在宇宙中到处都是，但每一颗又都有自己的独特之处。恒星中有热的超巨星、红巨星、类太阳恒星，它们都因其核心区巨大的“热核反应炉”消耗燃料而产生能量，发出辐射。有些恒星像我们的太阳那样孤独地在星系中运行，另一些恒星则两个或三个一起，在环绕的复杂轨道上起舞。有些恒星是成团的，其中最大的是“球状星团”，数十万颗恒星被密集地束缚在小于几百光年的空间内。但是，不管它们多么靠近或者寿命多长，所有恒星都经历从诞生到死亡的演化过程。

于是，如果我们努力观测，就可以发现已知恒星之间散布的一些新生恒星，它们仍隐藏在孕育它们的星云内。我们也发现了一些暮年的恒星，其中一些甚至已是包上了“裹尸布”，或者说是它们正在垂死痛苦的挣扎中不断把自身的大气



图 4.1 在巨大的、发光的热氢气体云（称为 H II 区）内通常可以找到恒星诞生的摇篮，这些摇篮是解开银河系恒星诞生之谜的关键。在这张红外拍摄的 SL 106 IRS4（一个恒星形成区）照片上，从 IRS4 中心的年轻热星发出的辐射照亮了周围的氢气体云，星云因受激发而发出美丽的蓝色辐射。此氢气体云的微红部分是一个反射星云，它周围的尘埃颗粒直接反射来自 IRS4 的光。由于红外像的明锐度，我们可以看到云中的波纹、细丝、彩带等的细节

抛向周围的空间；还有一些则正在衰退为暗淡的、小质量、低温的红矮星。本章主要探讨恒星演化过程的两端——恒星的诞生和死亡，因为这是宇宙无比奇妙的图景。

这似乎看起来有点不可思议，但天文学家确实直到最近才开发了一些仪器来研究恒星一直在告诉我们的秘密。观察满天繁星就好比漫步走进森林，观察所有



图 4.2 RCW 108 是另一种恒星形成区，在图中最昏暗朦胧部分的附近的云内隐藏的是正在形成过程中的年轻星团，靠近照片中心的大质量热星发出的强辐射“蚕食”着星云。亮的红色星云是中性氢云发出的光

不同形状、大小、年龄和健康状态的树木。那里高树和矮树参杂丛生，森林探险者可能断定高树比矮树年龄大。然而，这可能是个错误结论，因为有不同种类的树木毗邻，某些矮树的年龄可能大于邻近的高树。这里的幼苗长出芽来，也可能存在将杂草当做幼树的错误。森林地面上的死亡树干和干枯树枝来自于周围的树，但没有经验的观察者不可能把特定的干枝与周围的树联系起来，或者不能确定树干和树枝的死亡原因。一个探险者或许走过堆积的树叶，指出某种树叶是哪种树上掉下来的，然而你会怎样解释松针？你知道（松树的）球果和橡树果意味着什么吗？

于是，为了了解森林，我们必须学习有关树木及其生命循环的知识。对于恒



图 4.3 著名的猎户星云容光焕发（图的上部），它是离我们 1500 光年的猎户分子云复合体的一部分。在这幅红外像上，在左右两个亮部分之间的暗区，可以看到一个很密的星团。它是很年轻的，年龄可能不到 100 万年。由气体和尘埃组成的膨胀拱星盘有许多新生恒星。甚至在中央恒星度过其自身的狂躁不安的幼年时，也会在拱星盘内形成行星。红外摄像允许我们穿透拱星盘看到其内的年轻恒星。猎户星云的南面是 NGC 2023 星云（图的下部），这是另一个分子云，附近的大质量恒星的热量在“蚕食”它



图 4.4 处于我们银河系心脏地带的人马座恒星云。这是哈勃空间望远镜拍摄的。我们银河系中心方向的视野虽然被尘埃遮挡，但存在几个“窗口”可以让望远镜细看进去。这些“珍宝级”恒星有些是银河系最老的“居民”。通过它们的颜色，科学家可以确定它们的温度，从而得出有关它们的年龄和质量的结论。几乎所有的蓝星都是年轻的，比我们的太阳热上 10 倍。跟太阳比较，它们消耗自己的燃料快得多，寿命也短得多。红色的恒星可以分为两种：小的恒星和红巨星。较小的红色恒星通常只有大约太阳一半的热量，它们消耗燃料很慢，在恒星中它们的寿命是最长的。红巨星处于它们生平的终结阶段，因为它们消耗了自身核燃料的大部分。很多红巨星一度曾经是像太阳一样的普通恒星，但当它们开始缓慢地进入老龄期时便会发生膨胀，并最终死亡

图 4.5 哈勃空间望远镜用可见光和紫外光拍摄的大麦哲伦云星场合成图。统计揭示：在这个直径约 130 光年的区域内有 1 万颗以上的恒星。在恒星和发光气体背景上的暗片是星际气体和尘埃。照片上最暗的恒星比我们肉眼可以看到的恒星暗 1 亿倍。照片上的肩章形暗区（左上）是由拍摄所用的第 2 代宽场行星照相机的探测器布局所致

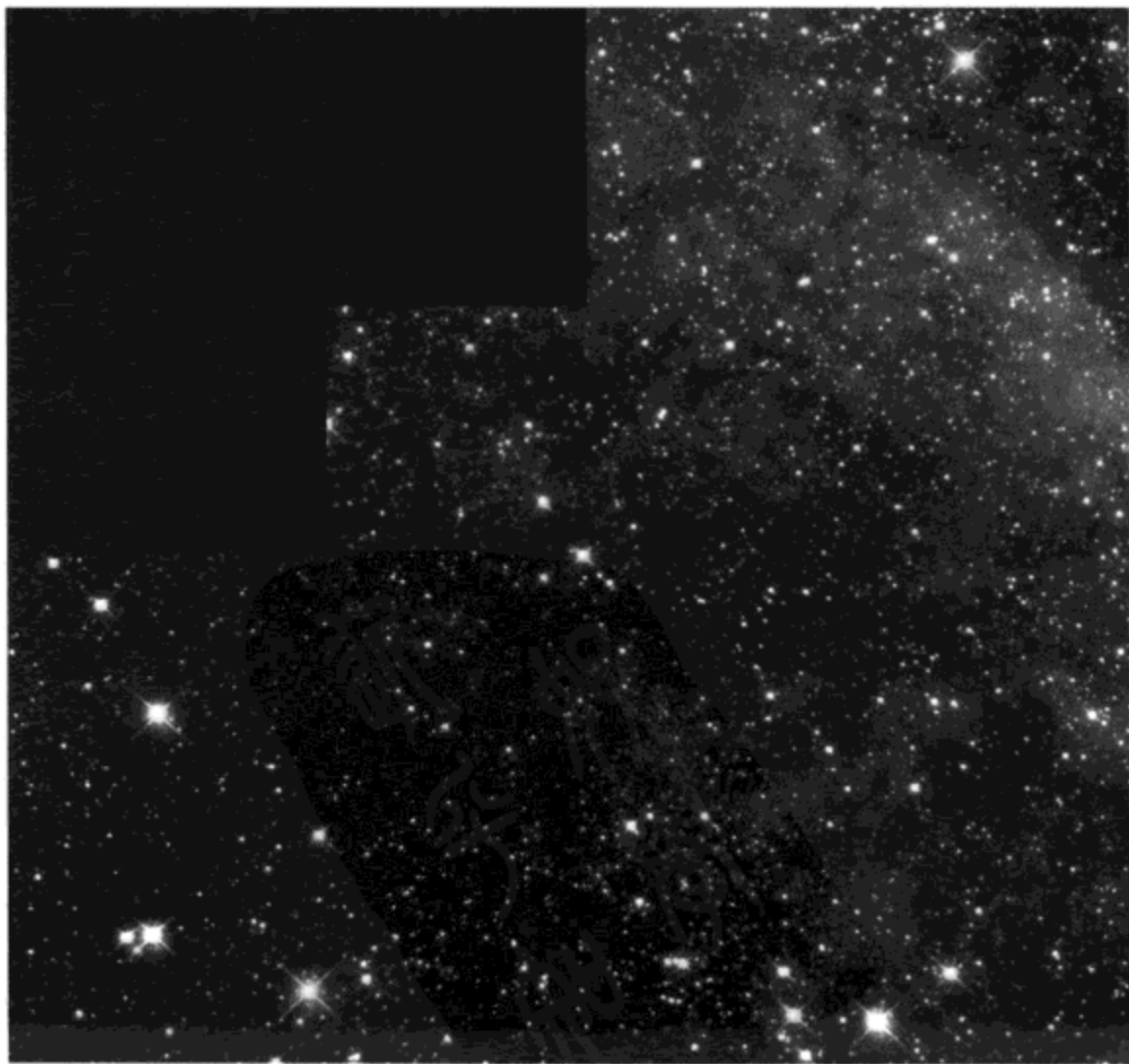


图 4.6 在这幅照片的右下部，可以看到亮星团 Hodge 301，它位于蜘蛛星云内，而蜘蛛星云本身是我们银河系近邻——大麦哲伦星云（星系）的一个恒星和气体的结。这个星团不是大麦哲伦星云中最亮的或最年轻或最密集的，而是几乎比它附近的其它星团老 10 倍。该星团的很多恒星是如此之老，以至于它们爆炸为超新星所致的剧变以几乎每秒 325 千米的速度向周围空间吹出物质。这些高速物质闯入蜘蛛星云周围（朝向左上），把气体压缩成发光的薄片和纤维



图 4.7 这个恒星“蜂群”是梅西叶天体表的 M80，它是银河系最密集的球状星团之一，位于离地球约 28000 光年远处。M80 包含数 10 万颗恒星，它们因相互引力的吸引而束缚在一起。与我们的太阳比较，这幅照片上的每颗恒星或者处于更老的演化阶段，或者在少数罕见情况下是质量更大。特别明显的是亮的红巨星，它们的质量与太阳的质量差不多，但已演化到它们生平的末期



图 4.8 在红外波段研究球状星团，恒星似乎是大致相同的。这幅南半天球的杜鹃座 47（星团）的红外像告诉天文学家：这些恒星大多是年老的红巨星和一群“渐近支巨星”，100 万颗恒星裹在不到 10 光年大小的球形区内。要知道，离太阳最近的半人马座比邻星离太阳也有 4.1 光年

星也是如此，然而不幸的是我们人类的寿命太短了，无法跟踪观察恒星从诞生到死亡的循环全过程。因此，我们要做的是反复观测处于恒星生平演化不同阶段的各类恒星，结合理论研究，来对我们看到的现象做出解释。

太 阳

97

太阳是太阳系的最大天体，它占太阳系质量的绝大部分。如果你能够把组成我们行星系“家族”的所有行星、卫星、行星环、彗星、小行星和太空尘埃加到一起，总共也只约占太阳系质量的 2%。太阳这个巨大的炽热气体球是主宰行星加热动力学的主要能源。太阳风是经常从太阳向外流出的带电粒子流，它吹出一个巨大保护“泡”——太阳风层，阻止恒星际粒子侵入，因而清晰地划出我们太阳系的边界。



图 4.9 目前人们了解得最多的恒星是太阳。在研究恒星的一般性质时，太阳占据着重要地位。科学家将太阳作为各种研究任务的参照恒星，用它来度量和评判一切别的恒星

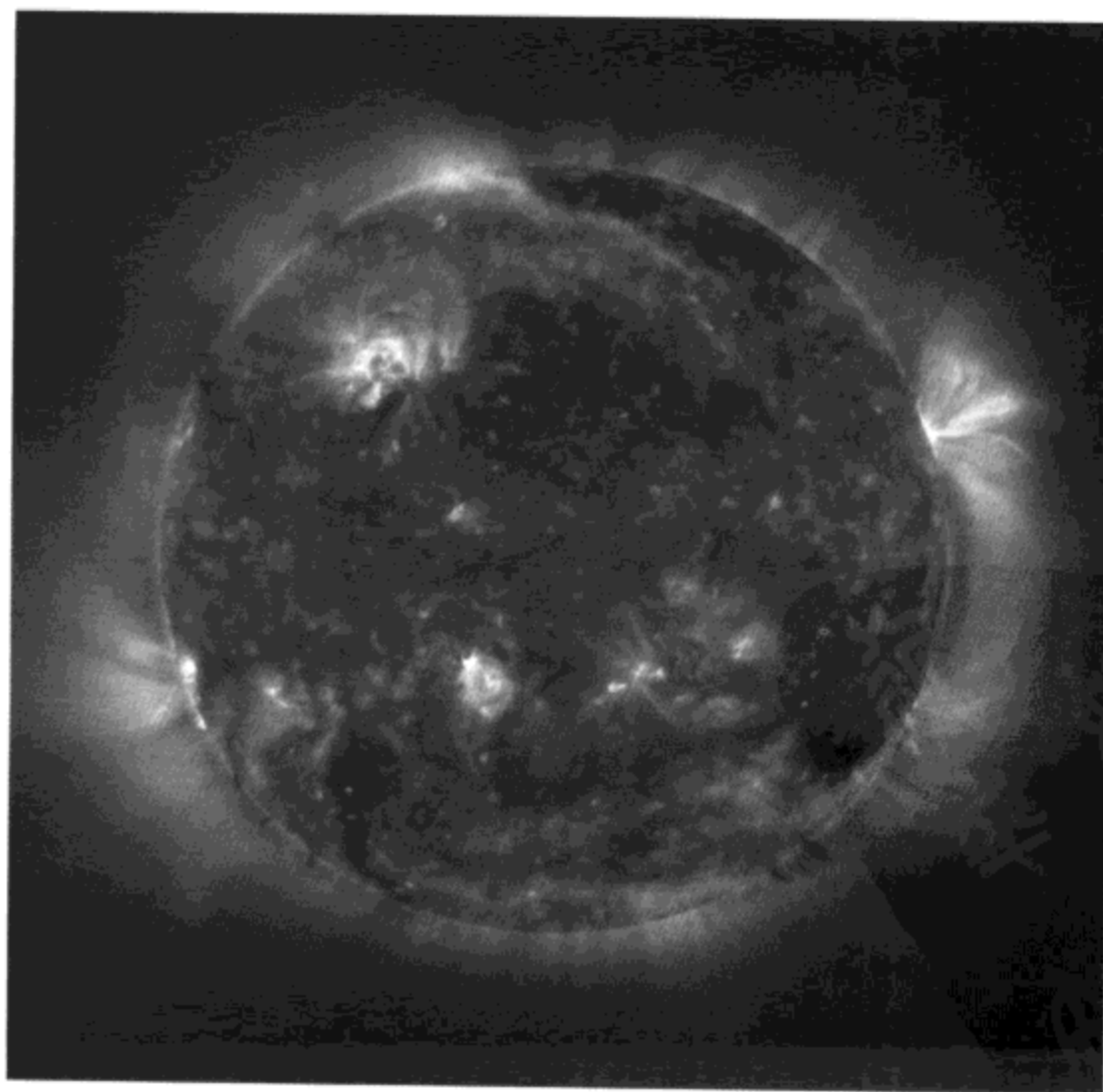


图 4.10 这是一幅合成太阳和太阳风层天文台 (SOHO) 所拍摄的 3 个波段的太阳像而得到的伪彩像，显示了不同温度的发射特征。微红色区表示 200 万度的气体辐射，绿色区是 150 万度的辐射，蓝色是 100 万度的辐射。绒毛状流是从冕洞和黑子上空结构沿磁力线流出的等离子体

所有这样的活动的能量都来自太阳内部深处的中心“燃烧炉”。那里极高的温度（1500 万度左右）和压力（3000 多亿倍地球大气压）造成了发生原子核反应的条件。太阳的“燃烧炉”每秒钟把大量的氢转变为氦（称为氢燃烧）。这种氢燃烧过程所产生的巨大能量从太阳内部的几层传输到达太阳表面，并从表面释放为光和热而辐射出来。太阳的氢燃烧全过程约维持 100 万年。

太阳表面的温度仅约 6000 度，比中心区的温度低得多。太阳的热表层称为光球（层），就是我们观察太阳时常见到的日面。日面上常出现暗斑，称为太阳黑子。光球向上邻接的太阳大气层称为色球（层）。色球物质比光球稀疏，对光球辐射是很透明的。色球本身的可见光辐射比光球弱得多，因此平时肉眼看不见色球；但色球本身在某些波长的辐射比光球强，因而平时通过特殊滤光器可以观测到色球。在发生日全食时，由于月球挡住了光球的强烈光辉，因此可以看见呈玫瑰红的色球。在太阳黑子区域上空的色球中经常发生剧烈的爆发增亮，称为耀斑。太阳大气最外部分称为日冕，那里的物质比色球还稀疏，只有在日全食时才可用肉眼看到日冕。但日冕的温度却高达百万度，炽热的气体向外膨胀而成为太阳风。天文学家经常监测色球的爆发活动，这些爆发活动形成的粒子流作为太阳风的一部分，穿过日冕向太空抛出。

一般来说，太阳已经这样辐射了 45 亿年，太阳可能在其核燃烧炉点火之前 5 亿至 10 亿年就已开始形成。在这个过程中，太阳已燃烧掉可用燃料的一半左右，但它可以将（氢转变为氦的）核反应至少再持续 50 亿年。当太阳耗尽其中心区的氢之后，便开始把氦和别的元素转变为可用燃料。同时，太阳会开始膨胀，逐渐“吞食”内行星。然后，太阳会成为红巨星，持续 10 亿年左右，再坍缩为缓慢冷却的白矮星。

各类恒星

我们感到幸运的是，我们的恒星——太阳的辐射不是太强，质量也不是太大，它恰恰处于恒星可能的特性和生平的中间。一切恒星（包括我们的太阳）都消耗（或者已经消耗了）它们中心区的氢，而辐射出所产生的能量。我们可以取一颗恒星的（表面）温度和它的本征亮度（光度）为特征量，从而按温度和光度对恒星进行归类。恒星的温度一般常指恒星可见表面的有效温度，光度则是恒星每秒钟发出能量的量度（译注：即辐射输出功率）。例如，太阳的光度为 4×10^{26} 瓦。恒星中，最冷的是亚恒星的“矮星”（如褐矮星），温度为 1000 度，而超热星（超巨星）的温度超过 20000 度，其他大部分恒星的温度则处于这两者之间。

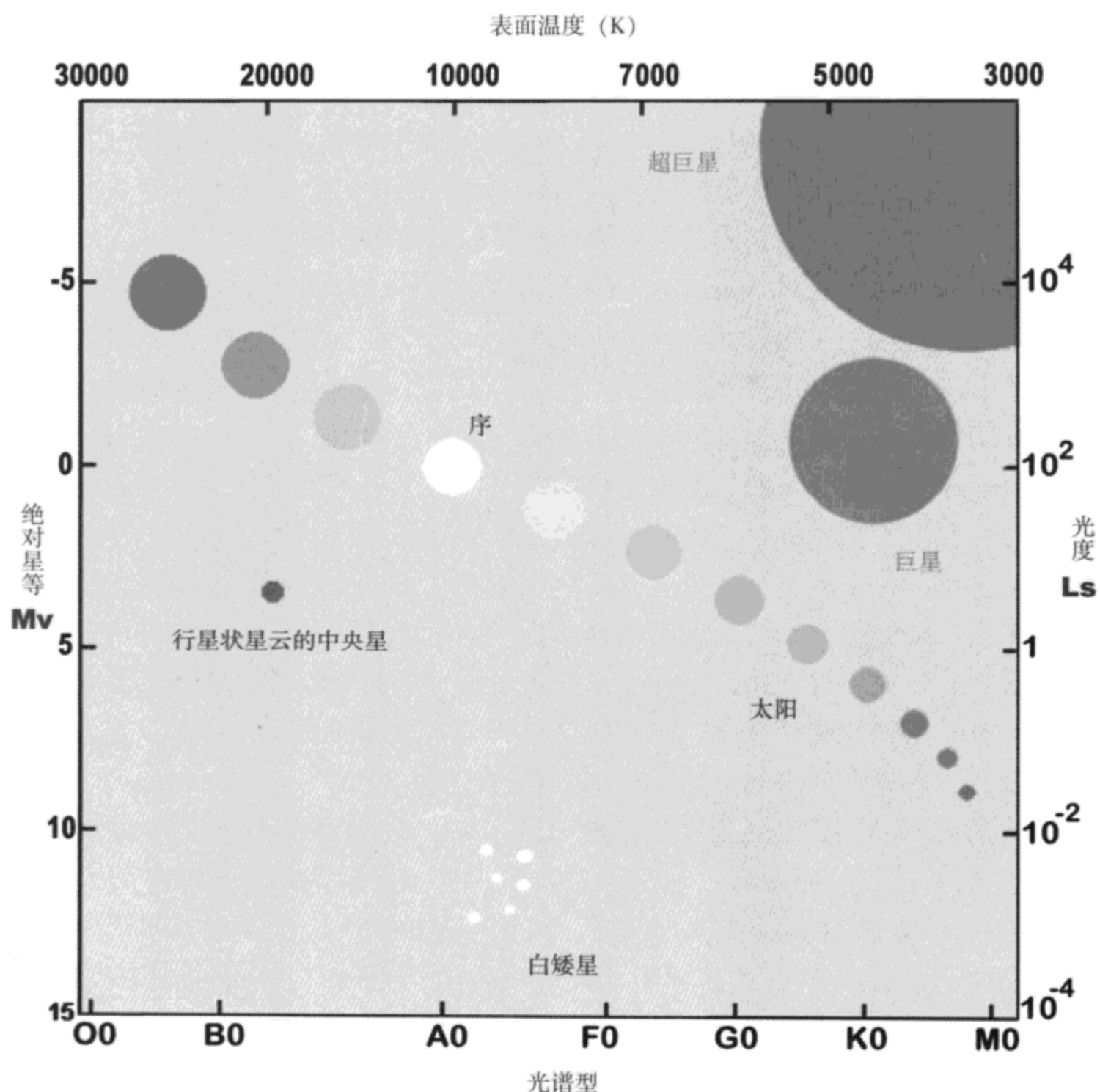


图 4.11 天文学家得出，在赫-罗 (H-R) 图上表现恒星的特性是很有用的。赫-罗图的横坐标表示恒星的表面温度或光谱型，纵坐标表示恒星的光度或绝对星等。于是，每颗恒星可在图上用一点表示。恒星的表面温度可以从其颜色或光谱型估算出来。赫-罗图不必表示出一颗恒星的年龄或者它与我们的距离。（没给标度的）彩色圆斑的大小能让我们直观地感受各类型恒星的相对大小（恒星半径）和它们演化过程中不同时期的大小变化

[译注：矮星和巨星的矮和巨是指恒星光度值大小而言的。]

绝对星等也是描述恒星光度的术语，即：如果把一颗恒星放在离我们 10 秒差距处它应有的视亮度（星等）。绝对星等是把所有恒星放到同样距离来比较它们的亮度，实际上是比较它们的发光能力——光度，从而允许天文学家集中研究恒星的质量、温度、压力等因素与其光度的关系。这样一来，我们就可以按照恒星的温度和光度对其进行确切分类。

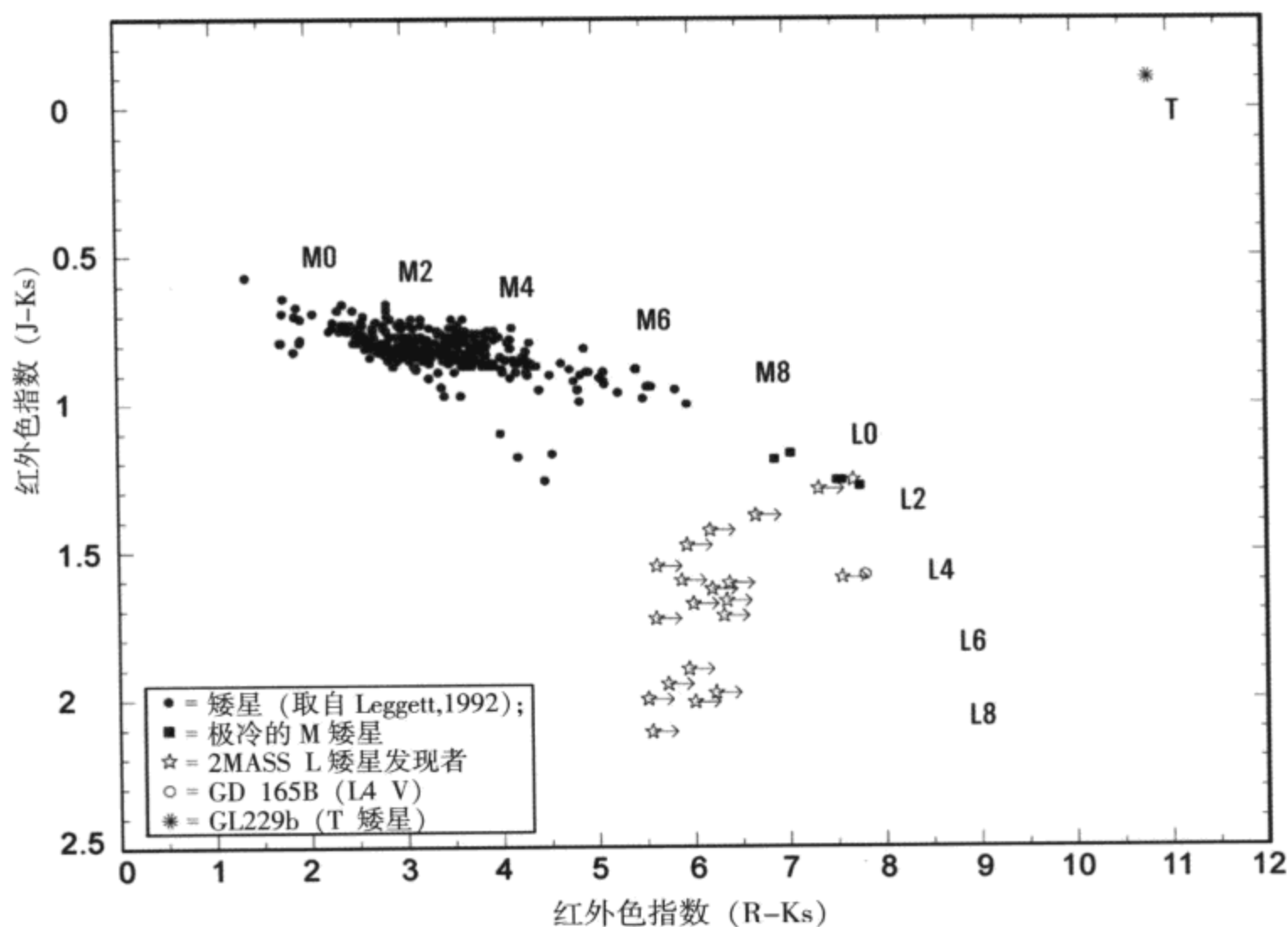


图 4.12 小质量恒星和亚矮星的红外色指数图有类似赫-罗图的曲线，划分为 L 类和 T 类的天体是肉眼见不到的，但它们在红外波段很明显。它们的表面温度甚至比冷的 M 型恒星还低很多

天文学家常以 L_s (太阳光度)、 M_s (太阳质量)、 R_s (太阳半径) 作为单位 (一般天文学书刊上也常用下标 $\odot$ 替代 s , 来表示有关的太阳物理量, 如 $L_{\odot}$ 、 $M_{\odot}$ 、 $R_{\odot}$), 来简便地表示其他恒星的这些物理性质。比如, 某颗恒星的质量是 $10M_s$, 这就是说, 它的质量是太阳质量的 10 倍。有的恒星的半径为 $0.1R_s$, 而有的恒星的半径超过 $10R_s$, 其他大部分恒星的半径在此范围内。现在, 天文学家正在探索一个天体至少应拥有多大的质量才能称得上是颗恒星。为了成为一颗真正的恒星, 一个天体需要有足够的质量, 才能在其中心区产生足够的高温来引发原子核反应。主要是通过对星空的红外研究, 我们已经观测到一些最小的暗弱天体, 它们真的是些“矮星”, 因为它们尚需 (或许永远也不会) 启动自身的核反应。“恒星”这一术语的定义也要经受奇异天体 (如中子星、黑洞) 的检验, 因为这些奇异天体根本不同于一般恒星。

一些大的恒星半径达 $100R_s$, 我们很难估计它们的质量。在小恒星方面, 我们发现了白矮星, 它们把 $1M_s$ 物质挤在约地球大小的体积内。中子星是超新星爆炸的残存星核, 它们是由大量中子组成的致密天体, 在仅约 30 千米大小的体积

内含有几倍于太阳的质量。恒星质量级的黑洞更是极端地小，大量物质永远封闭在小小的引力库内。例如， $5M_{\odot}$ 的黑洞是半径趋于零的“奇点”，但其周围会有物质绕着约 30 千米大小的黑洞的“视界”绕转。

探测恒星的摇篮

在开始寻求恒星诞生和死亡问题的答案时，我们发现在我们观察的很多地方都有恒星的摇篮。观察一颗特定的恒星诞生事件是另一回事儿，因为恒星形成的过程发生在非常长的一段时间里。我们能够采取的最好方法是尽可能多地寻找处于不同形成阶段的恒星，然后在尽可能多的波段对它们进行研究。通过这种方法，我们可以把很多恒星形成过程中的片段综合起来，从而形成对恒星诞生的整

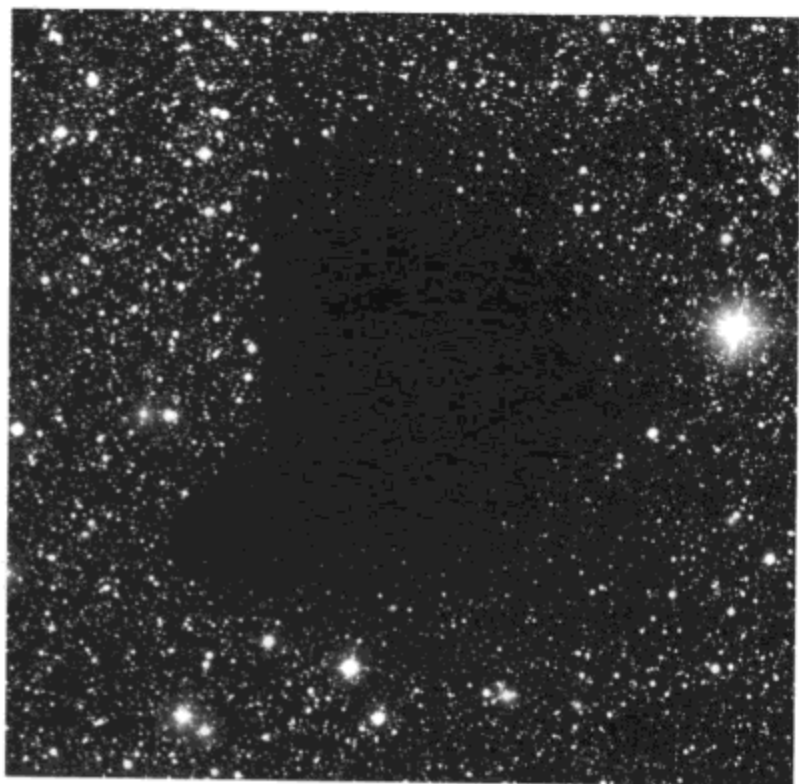


图 4.14 恒星摇篮猎户星云 (M42) 离我们约 1500 光年。它可能是我们拍得最多的深空天体。位于该星云心脏地带的星团含有几百颗新生恒星、原恒星和小质量矮星。该星云的中间部分被四边形星团中的恒星照亮。该星云本身是在猎户分子云（离我们也约 1500 光年）前侧形成的“气体泡”

图 4.13 你想知道我们的太阳系在 50 亿年以前看起来是什么样子吗？天文学家用甚大望远镜拍摄了暗分子云巴纳德 68 (Banard 68)。这幅照片是由可见光像和近红外像合成的。在这两个波段，由于云内尘埃颗粒的遮蔽效应，巴纳德 68 是完全不透明的

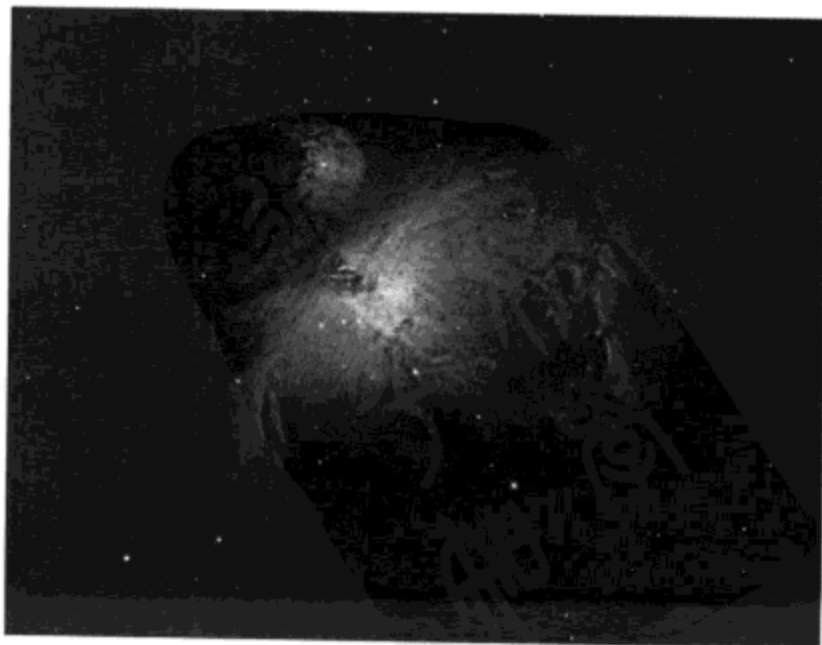


图 4.15 天文学家在红外波段研究猎户星云，看到了这个亮（由于云中的尘埃散射光和受热的氢气体发射光）而延展的云雾的很多细节。猎户星云北面是猎户分子云的另一部分和一系列红色的类恒星点子（显示年轻的、潜藏的原恒星）

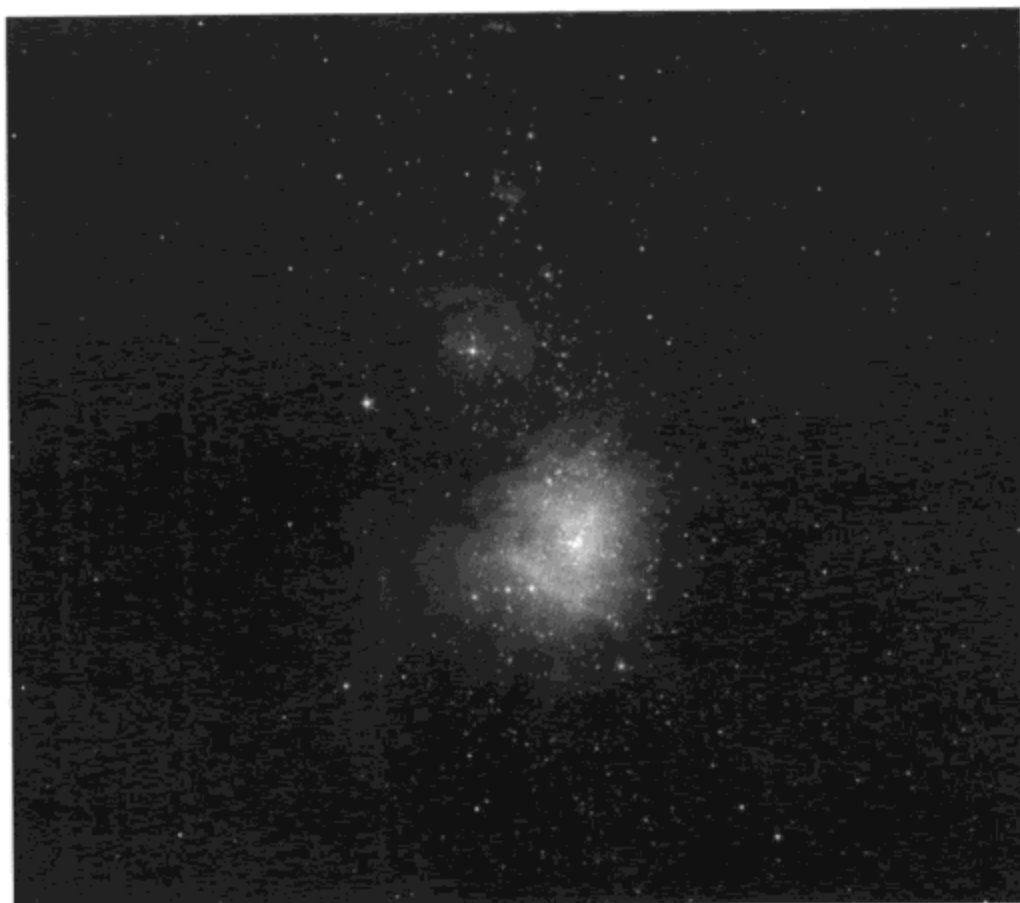


图 4.16 猎户星云中央部分的彩色组合像，由欧洲南方天文台的甚大望远镜用红外多模式 ISAAC 仪器得到的 81 幅像合成。著名的四边形星在照片中央显得非常醒目，旁边是由上千颗年龄约 100 万年的年轻恒星组成的星团

个过程——从冷的分子云到原恒星盘，到复杂的等离子喷流，最后到新形成恒星强烈发光——的完整认识。

猎户星云中的气体和尘埃云是离地球最近的恒星摇篮。猎户星云位于猎户（Orion）的钻石腰带上的 3 颗璀璨的恒星的下方，肉眼看起来像微绿色的淡烟雾。

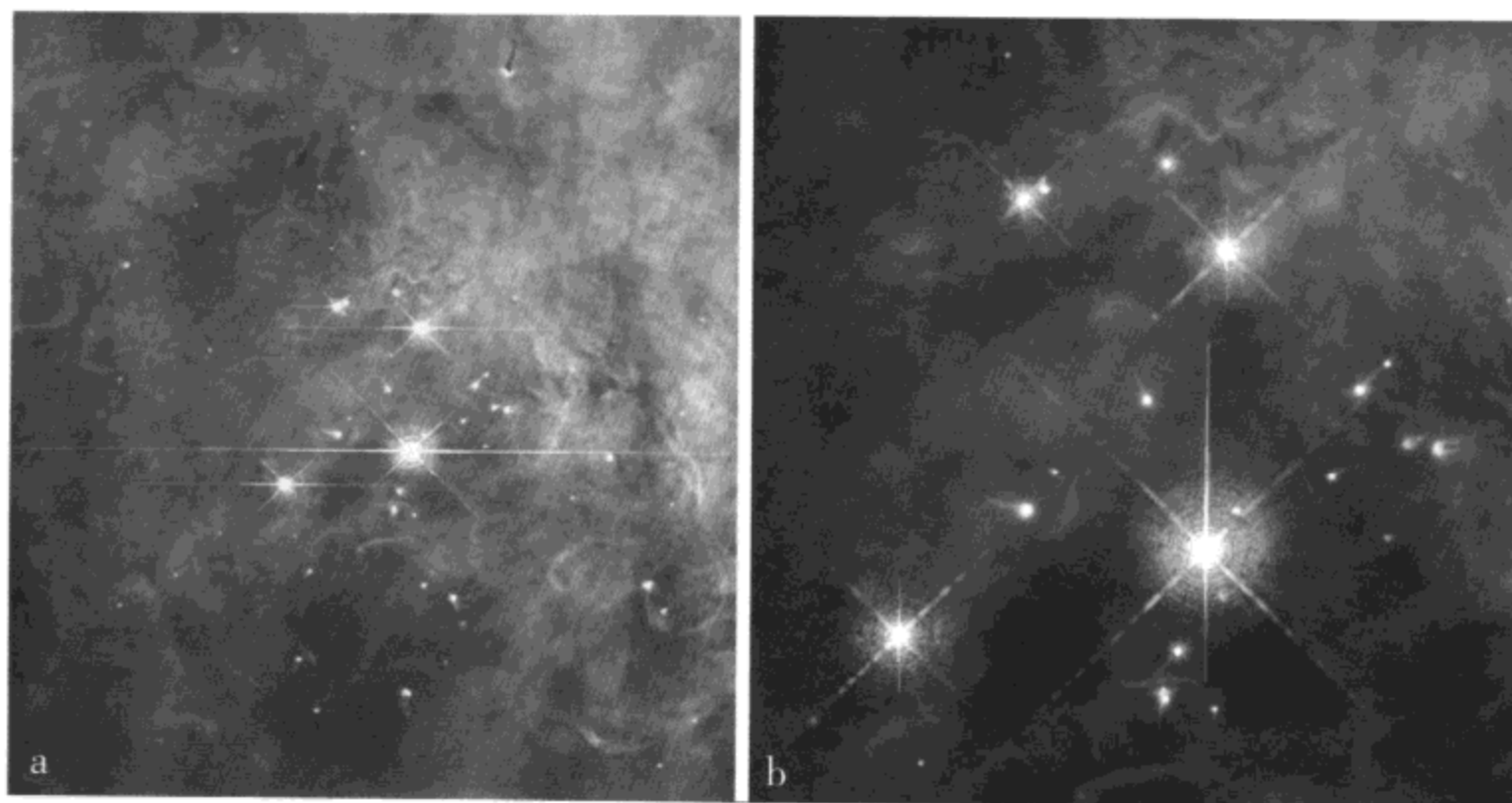


图 4.17 这两幅是猎户星云 M42 中的四边形星团中央部分的伪彩像，它由哈勃空间望远镜在几个波段拍摄的像合成。不同彩色表示云中的不同发光气体。在图 a 中，可以看到已蒸发的原始行星盘内的四颗大质量、高能量的恒星。图 b 为四边形星团及其年轻恒星诞生的伴随物的高分辨图像

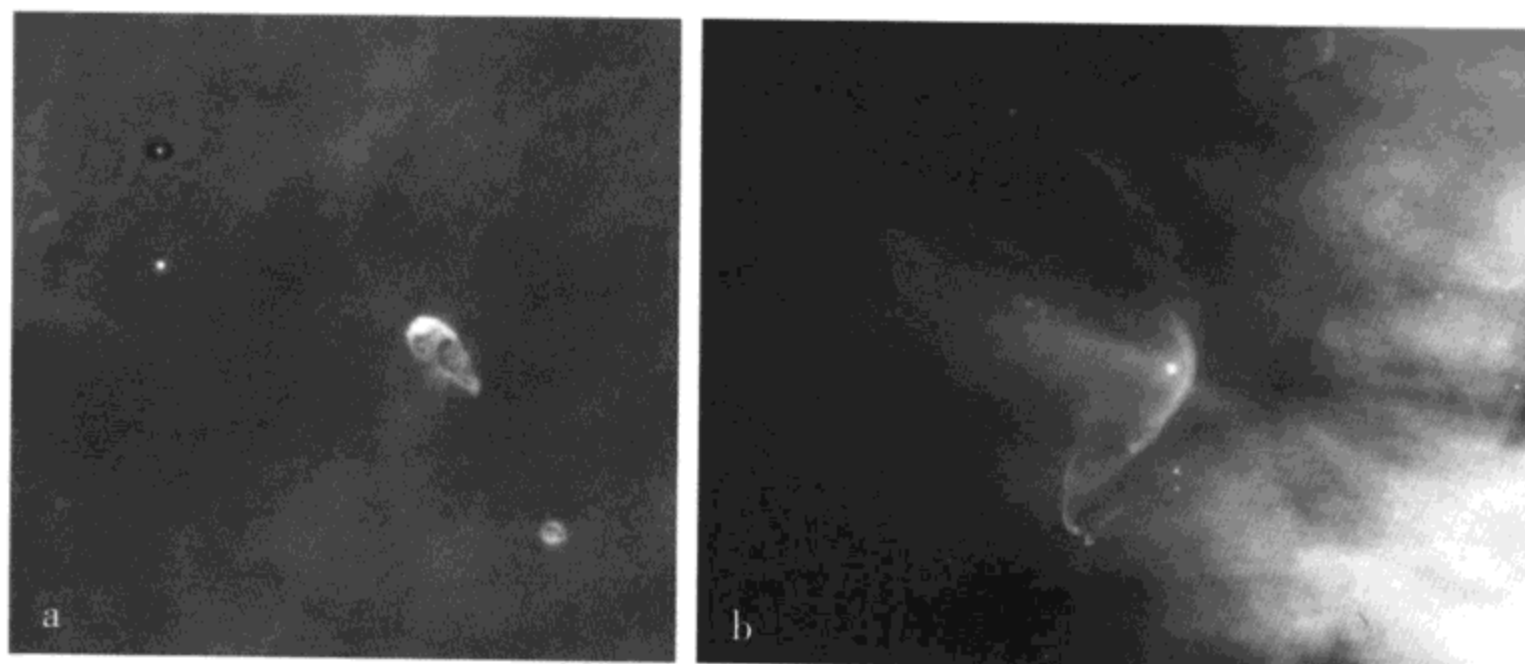


图 4.18 猎户星云中的这个拱（恒）星盘可以轻而易举地“吞”掉我们整个太阳系。它是一个正在被来自附近亮星的辐射“吃”小了的气体“茧”，其内部可能隐藏着一颗新生的恒星及行星系（图 a）。在猎户星云中，恒星形成的联合“风”把周围的气体和尘埃云“刮”成复杂形状。哈勃空间望远镜拍摄到了非常年轻的恒星（猎户 LL，也在猎户星云内）周围的弓形激波（图 b）

用大些的望远镜可以看出它是形状不规则的星云，那里散布有发光的恒星。在红外、可见光和紫外波段进行观测的研究者在猎户星云经常有令人激动的发现。为了了解猎户星云正在发生什么，我们有必要了解一下有关产生新恒星的气体云的相互作用方面的知识。



图 4.19 在可见光像上很难看到新生恒星周围的气尘盘（绕星盘）。哈勃空间望远镜的近红外照相机和多天体摄谱仪拍摄到隐藏在多尘发光云内的年轻恒星，这 3 幅图片是金牛座的年轻恒星及其绕星盘（离我们约 450 光年）

猎户星云是典型的“气泡星云”，它是在暗的物质云（称为猎户分子云）边界处的暴露区。这个“气泡”是年轻恒星的紫外光照亮云表面的区域。当我们注视这个“气泡”时，我们就是在观测亮的弥漫星云，这是氢气被来自邻近亮星的辐射所加热和电离而发光的。在过去的 100 多万年中，数以万计的新恒星在这一区域形成，某些最近形成的新生恒星刚刚在几十万年以前诞生。

猎户星云的中心也隐藏着上千颗约 100 万年前形成的恒星，它们是以 4 颗亮星为代表的四边形星团的成员。在可见光波段，仅能看到四边形星团中最亮的恒星，而在红外波段却能看到令人难以置信的细节。为了搜寻猎户星云中的年轻热星，天文学家用哈勃空间望远镜和位于智利的甚大望远镜上的红外探测器仔细地观测了这一区域。他们得到了丰富的成果，有助于解答像星际气体和尘埃云这样弥漫而稀疏的物质最终如何能够产生年轻热星的问题。

恒星的诞生在星际氢云内是不可避免的。气体分子和尘埃颗粒在所谓的“混合”过程中相互绕转运动和冲撞。给这些冷的分子云足够时间，它们就可能在外界来的某种力（像附近超新星爆发或者恒星路过之类的外来作用）的推动下启动恒星形成过程。高密度区开始形成盘状（气尘盘），而物质落向盘中心而聚集形成原恒星。恰如滑冰者在旋转时越转越快那样，原恒星转动加快。到原恒星聚集足够质量的时候，中心温度变得足够高，成为发光的恒星。

104

恒星诞生后，气尘盘内的遗留物质继续绕中心的恒星转动，而气尘盘最靠内的气体突然以高速喷流形式（译注：一般沿盘的转轴方向喷出而称为“双极喷流”）抛出来。气尘盘成为原行星盘——原行星形成的温床。原行星吸积物质，随着时间而演化，最终形成近似于我们太阳系的行星系统。在这一过程中，留下的东西位于新系统的最外围，就像我们太阳系冰彗星所在的柯伊伯带和奥尔特云。

105

图 4.20 这幅恒星诞生示意图模拟被一颗原恒星（用中心的小黑圆表示）照亮的（吸积盘）内区（约 50 天文单位大小）。原恒星周围是星云物质吸积盘，双极喷流从恒星射出。若有足够的时间和物质，就会在吸积盘中形成行星

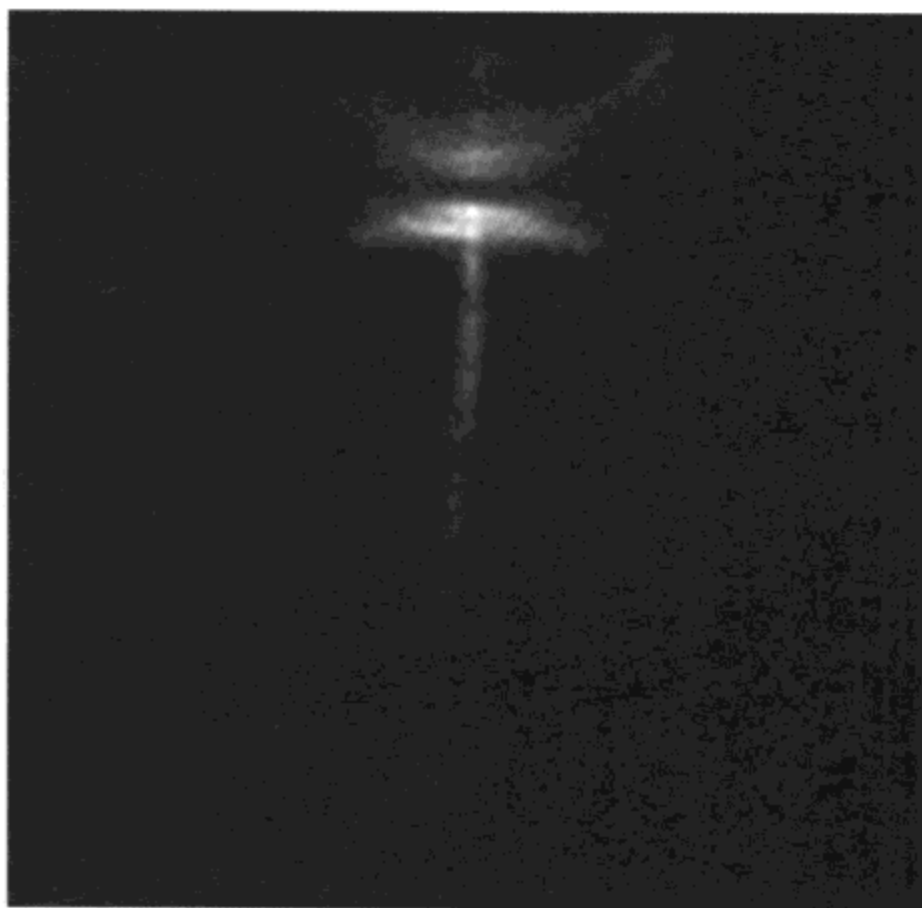
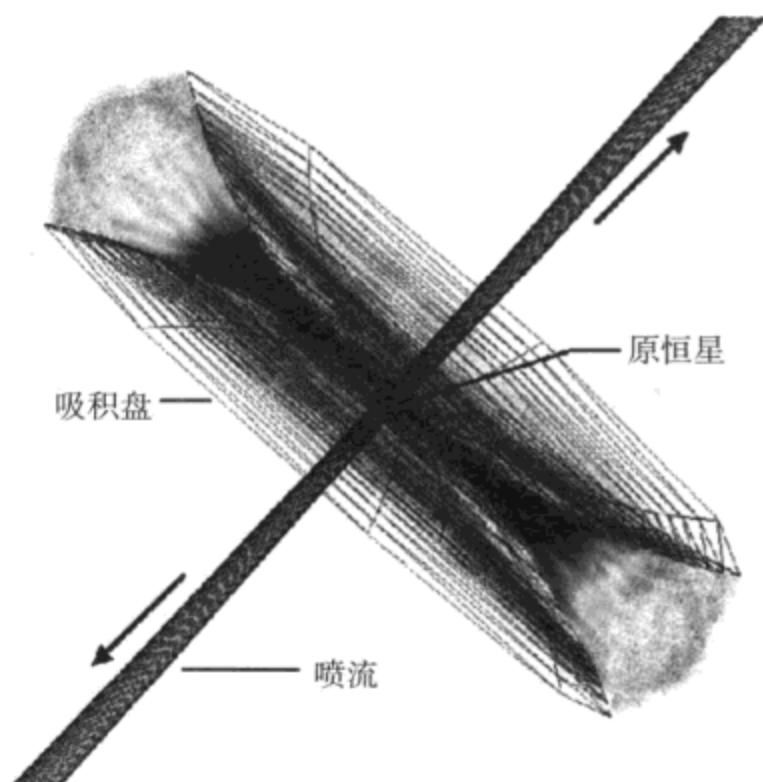


图 4.21 HH 30 是图 4.20 的活生生的例子。一个侧对我们的气尘盘遮住了新形成的恒星（位于盘的两个亮部分之间的暗带中央）。盘的宽度大约是太阳到冥王星距离的 12 倍，喷流垂直于盘面射出很远

既然所有这些恒星诞生过程在宇宙中继续进行着，那么我们可以认为，天文学家应该能看到围绕每颗新生恒星的气尘盘。虽然天文学家并没有看到，但这并不意味着不存在这样的气尘盘。这些吸积盘很难观测到，因为它们在某些阶段主要是由冷的气体 and 尘埃颗粒组成的，易被附近的恒星“抢了镜头”。

它们往往更容易在红外波段（而不是可见光或紫外波段）被探测到。

赫比格 - 阿罗天体

天文学家早已注意到星云物质的一些奇怪的“结”似乎与新形成的恒星成协。在 20 世纪 50 年代，美国加利福尼亚州利克天文台的赫比格（George Herbig）和墨西哥天文学家阿罗（Guillermo Haro）一起把这些天体划归一类。通

过研究，天文学家发现这些所谓赫比格-阿罗天体（HH）在恒星的形成过程中起着重要作用。通过综合由哈勃空间望远镜拍摄的图片 and 由配有灵敏 CCD 的地面宽场望远镜拍摄的图片得出的结论，科学家们发现了赫比格-阿罗天体对恒星和行星系早期形成阶段的贡献。当受热等离子体双极喷流从恒星射出来并冲入周围的气体和尘埃时，就产生了亮结——赫比格-阿罗天体。当这样的喷流急速吹进周围孕育着恒星的星云时，它就压缩而加热星云，把气体和尘埃推入扇贝形穴。

天文学家起先从理论上推测出存在从新形成的恒星射出的喷流并计算出其大小，但直到 20 世纪 90 年代才完全确认。现在，在多尘的恒星温床里寻找这些喷流已具有非常重要的意义。原因在于：在吸积的星云中，物质从气尘盘落入恒星而造成热的等离子体，热的等离子体经由喷流吹回到星际物质。从恒星高速射出的喷流在太空中穿越数十亿千米，呈窄的准直结构。显然，存在某种机制阻止喷流扩张或分开。天文学家认为，可能是恒星磁场和星云磁场之间的相互作用约束喷流使其成为我们所见到的窄直结构。

有关赫比格-阿罗天体的最新研究有助于我们进一步了解恒星的形成过程。肯定地说，喷流中的外流物质参与了恒星的形成过程，而令人惊奇的是这些喷流延展的距离非常远，有时穿过几光年的距离。当我们想到离太阳最近的恒星距太阳也刚刚超过 4 光年远时，我们不得不对这些喷流对银河系恒星形成区的可能影响程度感到惊诧！

造星柱

猎户星云只是最亮、最近的恒星形成区，事实上，形状复杂的恒星形成区遍布星空，一个最著名的例子是鹰状星云（M16）。它在巨蟹星座，离我们约 7000 光年远。近年来，科学家用设在智利的甚大（望远镜）阵对鹰状星云进行了红外

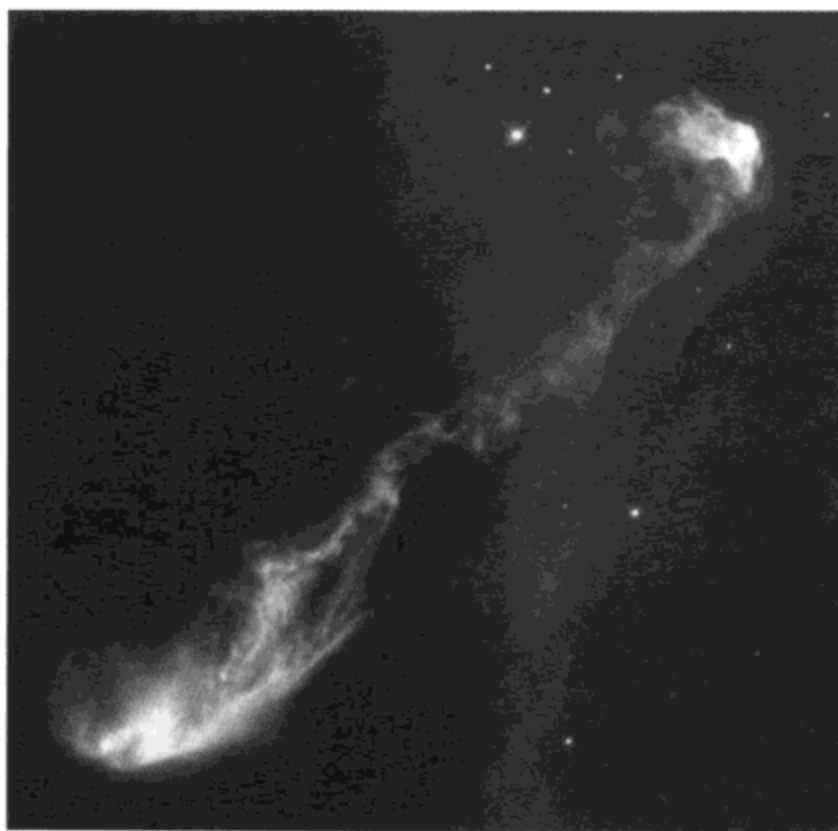


图 4.22 HH 47 的相关喷流呈现出复杂的图案，表明恒星（隐藏在图片左端的尘埃云内）可能因看不见的伴星的吸引而摆动



图 4.23 恒星形成区是复杂的区域。在那里,已形成的诸恒星与必定“离家出走”的年轻“弟妹们”群居。天文学家用甚大望远镜和特殊的红外传感器对鹰状星云的几个气尘柱进行了仔细观测,但是所拍到的气尘柱并不比哈勃空间望远镜所拍的可见光像清晰。这是因为,近红外光穿透了较薄层的气体-尘埃云,而只有(气尘柱)的头部仍不透明。很多红色天体与气尘柱成协:某些红色天体恰是透过尘埃所见的背景源,而有些是潜藏于气尘柱内的年轻恒星。图下部的紫色弧是 HH 216——一颗年轻恒星喷出的一簇快速运动的热气体

观测,用哈勃空间望远镜对它进行可见光观测。可见光像显示,几个由冷而密的星际气体和尘埃组成的巨柱伸向星空。附近的年轻恒星射来的光照亮了这个星云,而紫外光在侵蚀它们。正在形成的恒星仍全部隐藏在这些柱塔状结构内。

112 蒸发过程最终将年轻的恒星暴露出来,同时也限制恒星的成长。跟其他恒星分开的一颗孤单年轻恒星仍被气体和尘埃包围,这颗恒星可继续成长,直到它的质量增加到足够大而启动其内部的核反应。这时,这颗恒星就开始辐射光,且物

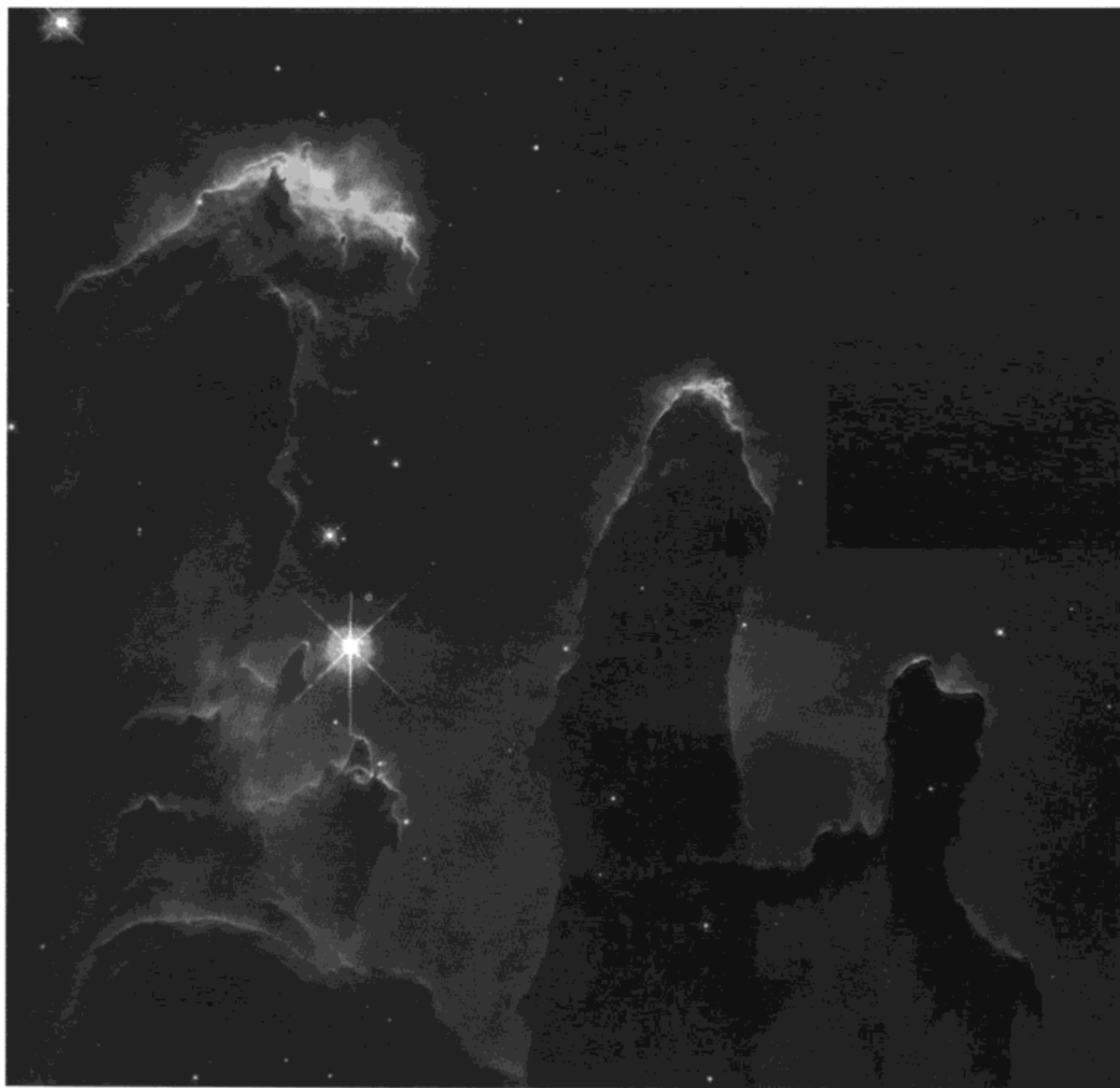


图 4.24 在哈勃空间望远镜拍摄的 M16 中的“造星柱” (Pillars of Creation) 可见光像上, 有很多潜藏在蒸发气体球内、仍处于形成中的恒星系统, 强烈的光和辐射正在“吃掉”它们周围的气体。来自附近恒星的辐射最终会吃掉其余的气尘柱, 切断这些原恒星系统的燃料, 从而可能完全中断它们的成长

质开始外流: 首先是以窄喷流形式, 而最终是星风外流。这种一颗新生恒星的“物质流失”也扫走局部环境物质, 而缺乏可吸积的环境物质就有效地终止了恒星成长到更大。若在原恒星发源地仅有一颗单星正在成长, 就更可能留下足够多的物质来形成行星。若在同样大的空间内正在形成足够多的恒星, 那么它们的成长可能会相互抑制, 而最肯定的是在它们的形成过程中将用掉所有可用的造星原料。在这些情况下, 不可能形成环绕这些恒星的行星, 因为没有留下任何物质, 甚至连最小的天体也无法形成。



图 4.25 这个看似怪兽的天体是名为锥状星云 (NGC 2264) 的气尘柱, 它位于一个离地球约 2500 光年远的、剧烈的恒星形成区内。来自附近恒星的紫外辐射正在吃掉诞生恒星的“茧”, 而使氢气发出红色亮光。一些恒星正躲在气尘柱后面窥视着我们。随着时间流逝, 锥状星云只会剩下密度最大的区域。在这些区域内, 可以形成恒星和行星

鹰状星云并不是气尘柱对恒星形成起着主角作用的唯一场所。锥状星云在 7 光年的巨大空间中延展, 且因来自年轻热星的辐射作用而发光。这些恒星的紫外辐射也“蚕食”星云, 将气体驱逐到周围相对空旷的区域。

鹰状星云和锥状星云都在大的三叶星云内。三叶星云是恒星的温床和家园, 正在被来自附近大质量恒星的辐射撕裂开。这个孕育恒星的星云位于人马星座, 约 9000 光年远。在那里至少有一颗新生恒星已开始生存, 它射出的一个喷流冲

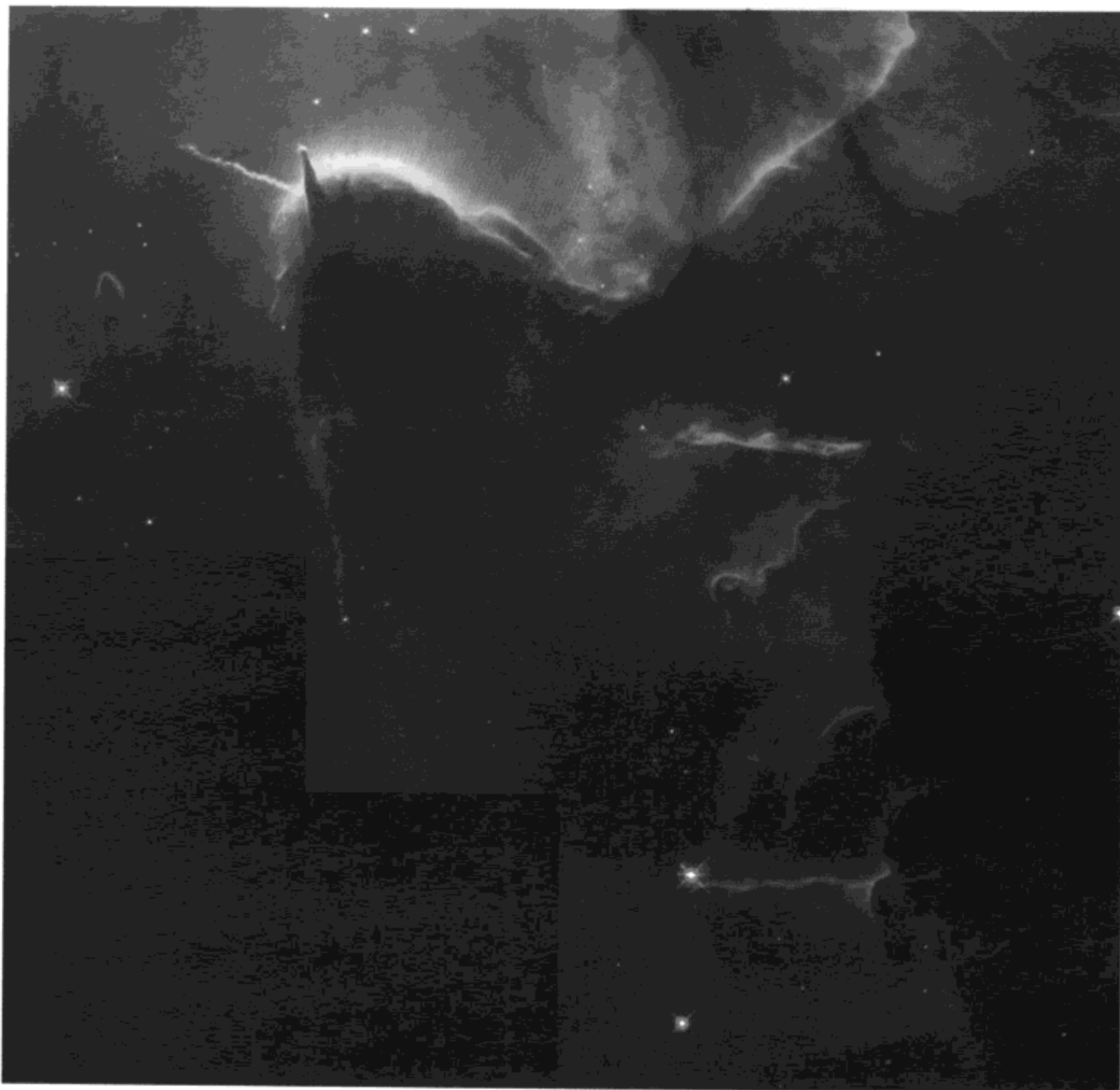


图 4.26 如果太阳是在一个拥有较老恒星伙伴的区域内形成的，那么会发生什么？哈勃空间望远镜研究了在三叶星云内的另一个恒星摇篮，那里的辐射中断了恒星形成过程。如果在太阳的附近形成了更大的伙伴恒星，很可能我们的太阳系就不会按现有的方式演化。一个恒星的喷流（图中从一个气尘柱射出、指向左上方的细束）是三叶星云内新形成恒星的证据。这是一幅伪彩像，只是模拟肉眼所看到的情景

入周围空间约 1 光年远，但它是一颗暗淡恒星。在以后的 1 万年里，来自三叶星云“心脏”地带的大质量恒星的辐射将最终将这个造星的星云完全侵蚀，消耗掉恒星继续成长所需要的物质。离上述的恒星喷流不远，另一个细长喷流从一个稠密云云的顶部指向中央的这颗恒星。这是一个典型的蒸发的气体小球。它的尖是亮的，可能是反射星光的缘故。来自星云内部的年轻恒星的辐射可能试图逃避其温床——三叶星云的约束。

太阳系之外的行星

最后，恒星诞生区的研究引发了关于环绕其他恒星的行星的问题。肯定地说，环绕新形成恒星的气尘盘是寻找行星的公认场所，我们的太阳系正是以同样的方式在 45 亿年前形成的。人们真正想看到的是环绕其他恒星的已形成的行星，而科学家正更多地着重于研究探测这种行星的方法。哈勃空间望远镜已探测到环绕近距恒星 Gliese 229 的 40~50 倍木星大小的天体。很可能这个天体是一颗褐矮星，与它的明亮的伴星同时形成。目前，人们已经发现 100 多颗环绕其他恒星运行的天体。由于天文学家改进了搜寻暗淡的遥远天体的方法，因此发现这类天体的数目在增多。发现这些太阳系之外的行星的最直接方法是把望远镜对向可能的恒星系统，尝试发现在轨道上运行的行星。但这种方法的问题在于：跟恒星比较而言，甚至与木星大小相仿的行星也是太小和太暗而不易发现的，它们一般隐藏在其母恒星的明亮光辉中。于是，天文学家更依赖于用间接方法去寻找行星对恒星星光的影响。

开展这种工作的一种方法是多普勒光谱学方法。若恒星有行星，那么它们实际上都绕共同的质量中心转动，于是恒星就可能存在相对于我们的运动，导致它的光谱略微变化。天文学家把这样的变化称为多普勒效应——光谱线向光谱的红端或紫端移动。用这种方法可以发现木星或土星大小的行星。目前，地球大小的行星因多普勒效应不明显而难以探测到。

发现行星的另一种方法是观测“行星凌恒星”（即行星从恒星与观测者之间经过）造成的恒星亮度变化。在太阳系，当水星或金星从太阳和地球之间穿过时，我们就看到一个小圆斑经过太阳圆面，即“水星（或金星）凌日”现象。当行星凌（它绕转的）恒星，它就遮挡住恒星的部分光，足够灵敏的仪器可以测出恒星亮度少量变化的情况。显然，行星越大，它挡住的（恒星的）光越多。因此，这种方法也更有利于发现木星大小的行星，而发现很小的行星就需要极其精密的测量。这种方法的另一缺点是要求行星的轨道面与我们的视线重合。

最后，天文学家可以观测恒星的自行轨迹变化，这种变化可能意味着存在一颗行星（译注：由于恒星自身在空间是运动的，我们就会观测到恒星在星空有位移——自行轨迹。单颗恒星在较短时间的自行轨迹近似于一段直线；而有伴星的亮恒星的自行轨迹是摆动的）。行星会对它绕转的恒星施加少许引力曳引，这使该恒星的位置发生周期性的微小摆动。这就像该恒星和舞伴在舞场跳舞——时而移向这侧，时而移向另一侧。这种方法的使用受恒星的距离和行星轨道周期的长

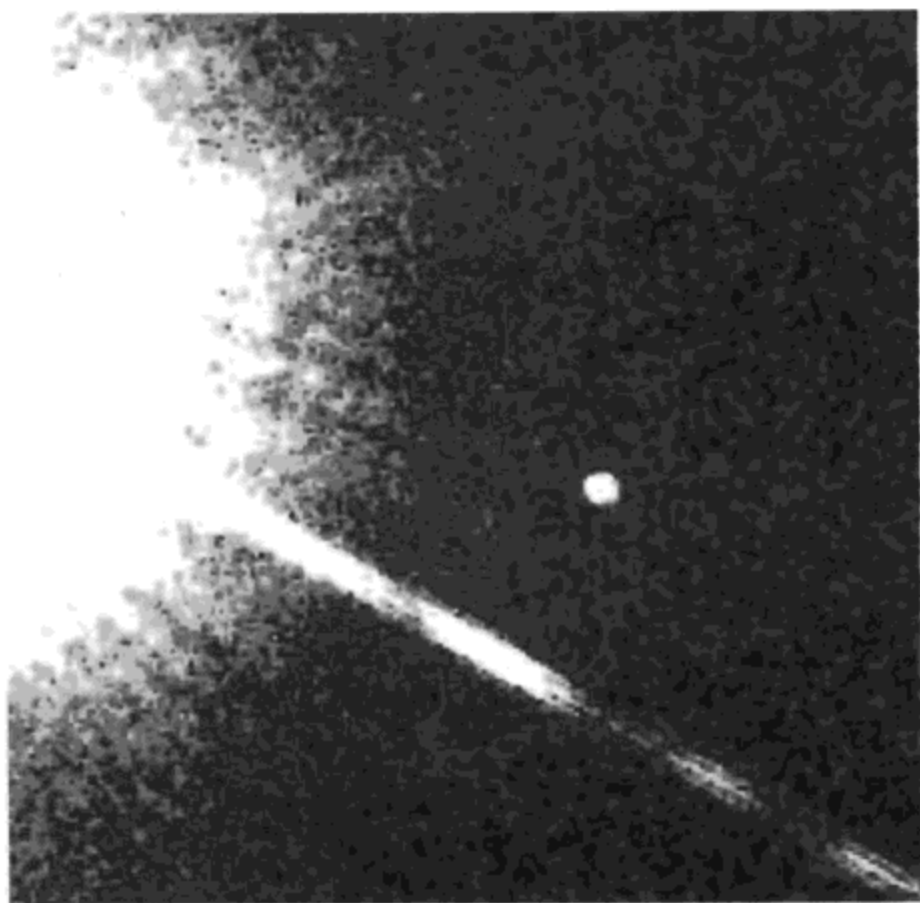


图 4.27 Gliese 229 及其褐矮星伴星 229b。褐矮星与恒星的形成方式一样，但褐矮星没有足够大的质量支持其中心区的核燃烧。它们不像恒星那样发光（译注：而是在自身引力收缩中，势能转化为热能才发光）。装有红外滤光片和传感的仪器可以探测到它们

短的限制。到目前为止，通过这种方法确定的行星只有几颗。

115

关于寻找行星的最令人激动的成果是：在太阳系之外确实存在环绕某些恒星运行的行星，而且我们可以发现它们。天文学家可能会在某处发现一颗大小与地球相当、围绕附近的一颗恒星作轨道运动的行星，并可能会进而分析这颗行星的大气、寻找水的痕迹甚至可能的生命。这些只是时间问题。[译注：很遥远的亮天体（例如，类星体）射来的光线经过有行星环绕的恒星近旁时，就会受到后者的引力而发生微小弯曲——就像光线经过透镜而弯曲那样，故称为“微引力透镜效应”。最近，天文学家通过微引力透镜效应的观测发现了环绕一颗褐矮星的类地行星，名为 OGLE-2005-BLG-390Lb，距地球 2.8 万光年，质量大约是地球的 5.5 倍，它离该褐矮星 2.6 天文单位。至今已发现 170 多颗太阳系之外的行星，其中有 3 颗行星构成仙女座 υ （希腊字母，读“宇普西隆”）恒星的行星系。]

狂啸过的恒星墓地

可能形成行星的恒星之诞生和具有毁灭世界的威胁的恒星之死亡激发了天文学家极大的研究热情。恒星的摇篮和墓地遍及宇宙各处。恒星怎样死亡主要取决于它临终时的质量，而不是它的原始质量。恒星的死亡是因为后期的猛烈热核反应所致，造成其外部物资抛出，而不同质量的残骸收缩为三种致密星体——白矮星、中子星、黑洞。

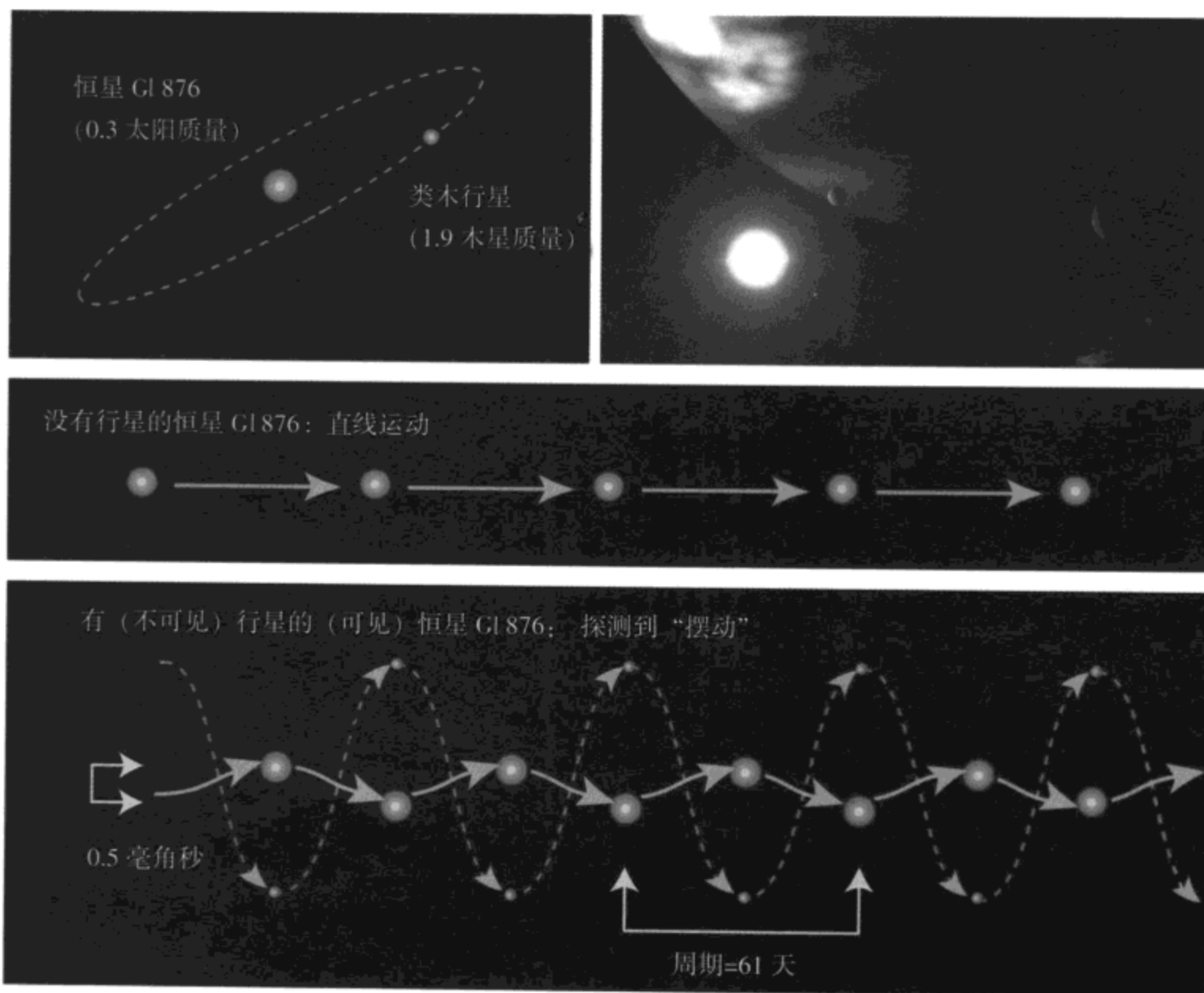


图 4.28 人们已经知道红矮星 Gliese 876 有绕其进行轨道运动的天体。2002 年，天文学家用哈勃空间望远镜的精密导航传感器测量这颗恒星在自行轨迹上的两侧摆动。此摆动是由于不可见伴星（命名为 Gliese 876b）的曳引所致。该伴星的质量将近木星质量的 2 倍，因而可能是一颗行星。右上图是这颗可能存在的行星及其几颗卫星的艺术画，而红矮星 Gliese 876 在远处。精密导航传感器（有时称为“追星器”）可以进行星空中天体之间的准确天体（位置）测量。天体测量学的主要任务是测量和研究天体的位置和运动

一些类似太阳的恒星都是在氢燃烧（氢转变为氦）的主序阶段平稳地度过它们生平的大部分时间。这种过程结束时，它们将经历红巨星阶段。而后，恒星将坍缩，留下看似怪异的气体壳包围它，这样的气体壳成为“行星状星云”。最后，恒星冷却和收缩，成为地球大小的白矮星。

略大于太阳的一些恒星（最后的质量为 $1.4M_{\odot} \sim 3M_{\odot}$ ）也在主序阶段（氢转变为氦）度过几十亿年。当它们收缩时，它们可能成为“中子星”（之所以称为中子星，是因为在这些恒星的中心区引力很强而质子和电子被压到一起而形成中子）。质量超过 $3M_{\odot}$ 的恒星不会成为中子星，它们会爆炸而成为超新星，而死亡恒星的残余物会进一步收缩，形成恒星级黑洞。黑洞的引力是如此之强，以至于连光子也不能逃离黑洞，因此我们不能直接看到黑洞。但我们可以探测到落向黑

洞的热物质发出来的辐射，从而间接地判断黑洞的存在。

我们的宇宙始于“大爆炸”，原始火球产生最轻的元素：氢、氦、氦和少量锂。为了弄清较重元素的来源，就得观测和研究恒星的死亡，它是宇宙中根本的轮回过程。大质量恒星爆炸为超新星，在它们的原子核燃烧炉里冶炼出了诸如碳、氧、钙和铁等元素。当这些大质量恒星死亡时，它们把这一切物质“吹”到星际物质中。超新星则更进一步，创造了重于铁的基本元素并将其抛射到宇宙中。后来，所有这些物质又形成下一代恒星、行星乃至我们的身体。

恒星由星际气体和尘埃形成，而在恒星死亡的各种过程中，恒星物质又重新变为星际物质，这是无休止的循环。这就导致了宇宙中的重元素数量随着时间流逝而增多。例如，太阳和行星中的物质至少是已经由上一代其他恒星“加工”过了的。因此，在我们的身体里有早已死亡的恒星的原子。通过世代恒星追溯这些化学元素的来源是探索我们自己在宇宙中的地位的一种方法。

恒星的死亡

116

大多数恒星的生平主要是在所谓主序星阶段度过的。当一颗恒星经历过幼年阶段的剧变，便进入它的青壮年期——主序星阶段。恒星在这一阶段是比较稳定的和长久的，消耗氢原子核转变为氦原子核的核聚变反应产生的能量。我们知道，太阳在其中心区进行着这样的“氢燃烧”的（原子）核反应过程，以光和热的形式释放能量。在生命的早期阶段，太阳几乎全部都是由氢组成的。进行氢燃烧时，生成的产物或燃烧的“灰烬”是元素氦，逐渐形成氦的星核。于是，随着氢燃烧的进行，氢越来越少，氦的星核越来越大。这个主序阶段将持续到将近恒星质量的 $1/10$ 转变为氦。以太阳为例，它的主序阶段已进行了约 45 亿年，但还会继续 50 亿年，平稳地将氢转变为氦。这也是太阳一生中最美好的阶段。

很不幸，这样的情况不会永久地延续下去。当太阳的氦的星核变得如此之大，以至于太阳不再稳定，“闹剧”便开始了。恒星的星核开始收缩，启动氦燃烧，因而温度升高，进而导致外部大气膨胀，于是太阳变为红巨星。最后，抛出的外部物质形成“行星状星云”，而残骸坍缩，变为了一颗持续时间很长的、缓慢冷却的白矮星。在较短的一段时间内，白矮星被较早时期（红巨星时期）抛出的云幕（行星状星云）包围着。类似的命运等待着与太阳质量大致相当的其他恒星，然而某些有伴星的白矮星可能吸积伴星流过来的物质而变大，最后爆发为 Ia 型超新星。

比太阳质量大的恒星也在主序阶段度过较长时间。在它们的氢燃烧和氦燃烧 117

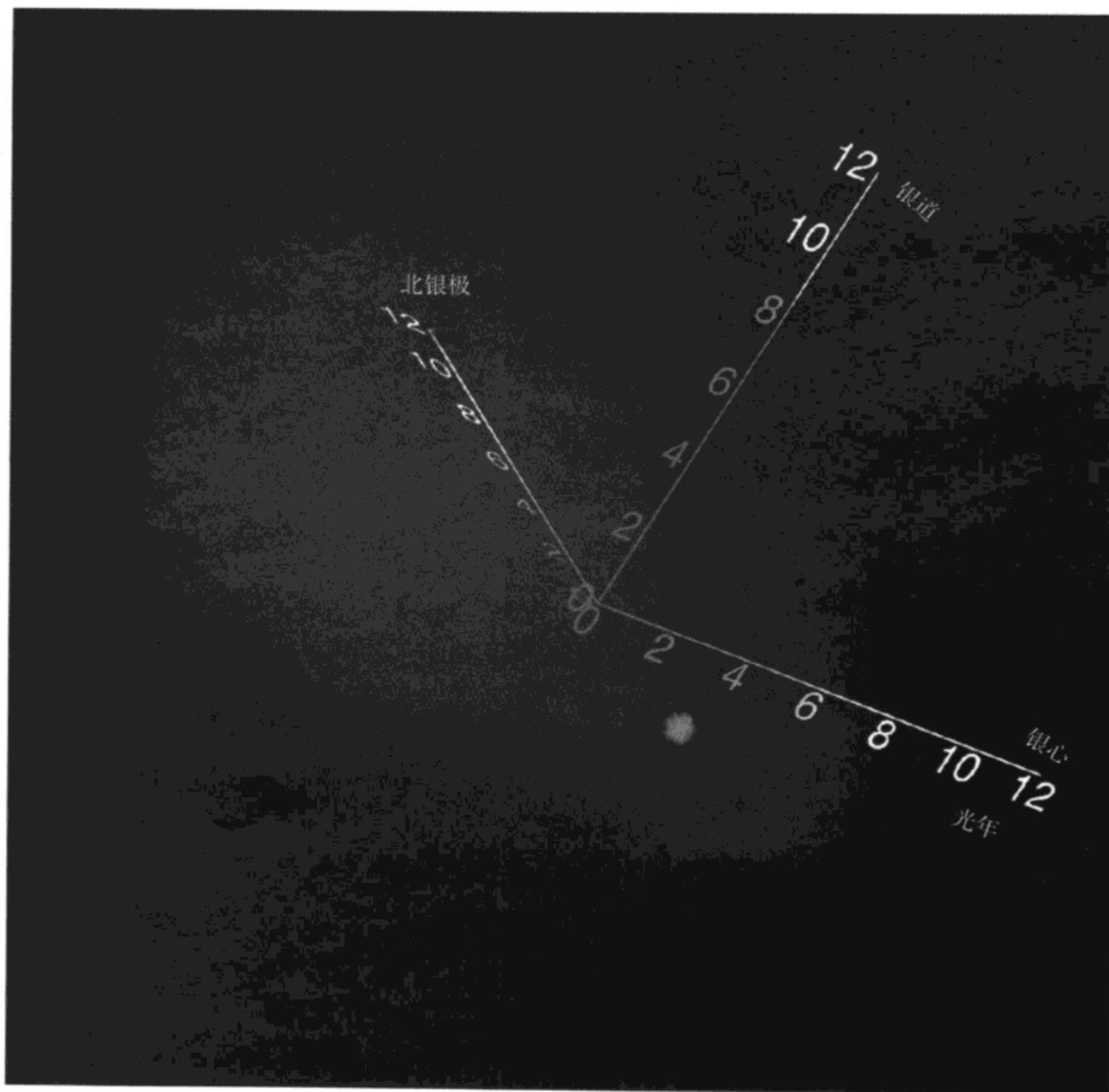


图 4.29 对太阳系周围的星际物质进行研究分析可以帮助我们确定这些星际物质中存在着什么天体及这些天体的组成情况。了解存在于星际物质中的元素的一个好方法是精确测量透过这些星际物质的星光（通常用紫外）光谱。这些（需要花费很长时间的）测量工作可以帮助我们确定诸如分子云经过空间的速度之类的资料。在这幅计算机模拟图上，太阳系（右下小黄点）似乎处于一个缓慢移动的热的氢气云团（本星际云团，Local Interstellar Cloud）内，该云团已经过了银河近邻的一部分，并将在未来 3000 年内完全经过太阳系。该氢气云团是被来自（400 光年远的天蝎-半人马星协的）年轻热星的星风和超新星激波推进。在图中，太阳系的太阳风层显得很小时，靠近这个本星际云团的后部并被其包围。当这个本星际云团离开时，会将太阳系抛在身后。在这个坐标系中，原点（0，0）在本星际云团的三维中心

结束时，燃烧过程还会进一步继续，并依次产生较重元素（硅、碳、氧）的燃烧壳。实际上，前一燃烧的灰烬将成为下一燃烧阶段的燃料。终于，星核积聚更多能量，以至于恒星膨胀，变为巨星，从而开始了结束主序阶段和走向死亡的第一步。

燃烧的最终结果是生成 1Ms 的铁星核。燃烧铁比生成铁需要的能量多得多。这时，灾难性的转变发生了。在这些很大质量的恒星内，中心部分坍缩，外部以超新星爆炸抛出，残骸坍塌成为中子星，如果原先恒星的质量超大，残骸就坍塌为黑洞。

行星状星云

当太阳大小的恒星到达它们演化的最后阶段时，它们成为行星状星云的中央恒星（之所以称为行星状星云，是因为在早期用小型天文望远镜观测到它们有类似行星的视面），星核内的（原子）核燃烧结束。到这时，星核可能是简并的碳-氧混合物，占该星质量的一半。包围星核的是氦燃烧壳和氢燃烧壳，最外面是氢包层，由被抛出的气体和尘埃组成的巨大外壳（行星状星云）从恒星向外膨胀。因为恒星继续产生能量，从而抛掉其外层，因此热的星核暴露出来，其表面温度增加到 25000 度。这一温度已足以产生大量紫外辐射，从而激发周围由气体和尘埃组成的巨大外壳（行星状星云）电离并发光发亮，显示彩色绚丽的结构。行星状星云中央的白矮星则是该恒星临终阶段的“化石记录”。 119

多年来，天文学家的头脑中有一幅“典型”的行星状星云的标准像，这主要是受最著名的行星状星云——天琴座环状星云的形状的影响。天琴座环状星云完

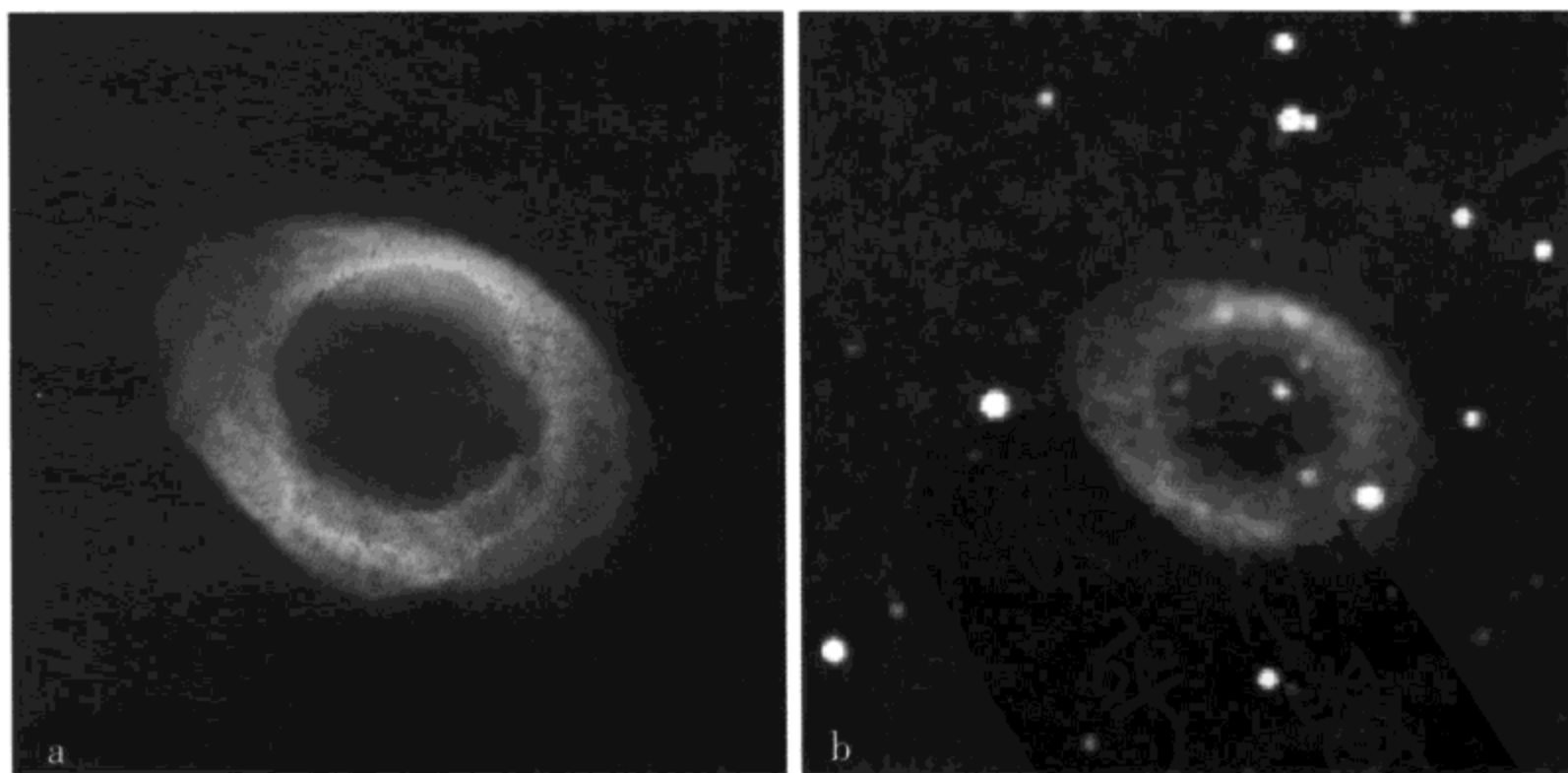


图 4.30 图 a 为用哈勃空间望远镜拍摄的环状星云的可见光像，图 b 为“2 微米全天空巡天计划”所用的望远镜拍摄的环状星云的红外像。在图 b 中，星云外区的红色是由于原子氢和分子氢的红外发射，中央恒星在此像上很暗淡，这是因为“2 微米全天空巡天计划”所用的望远镜对它的高温和蓝色不敏感

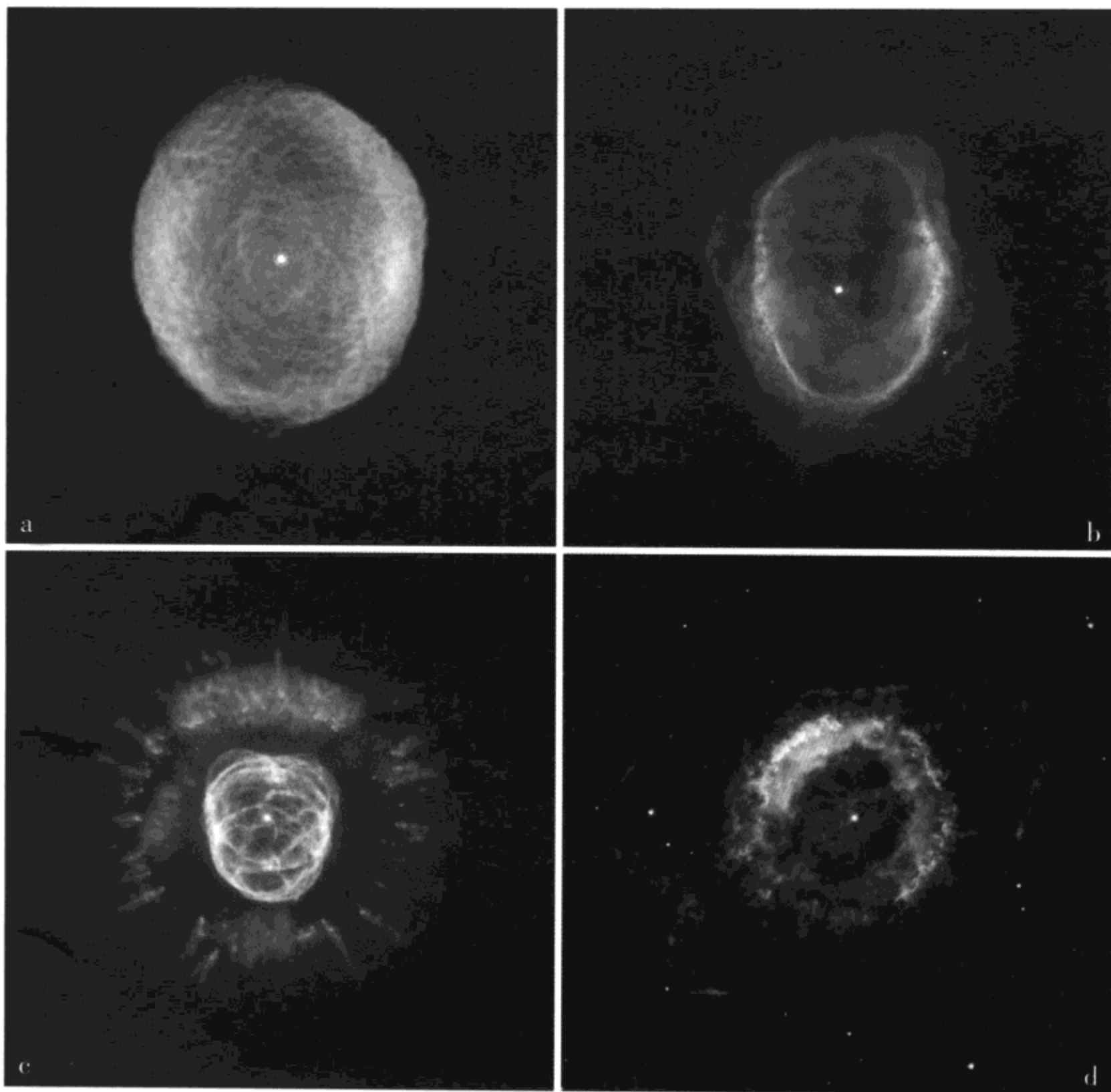
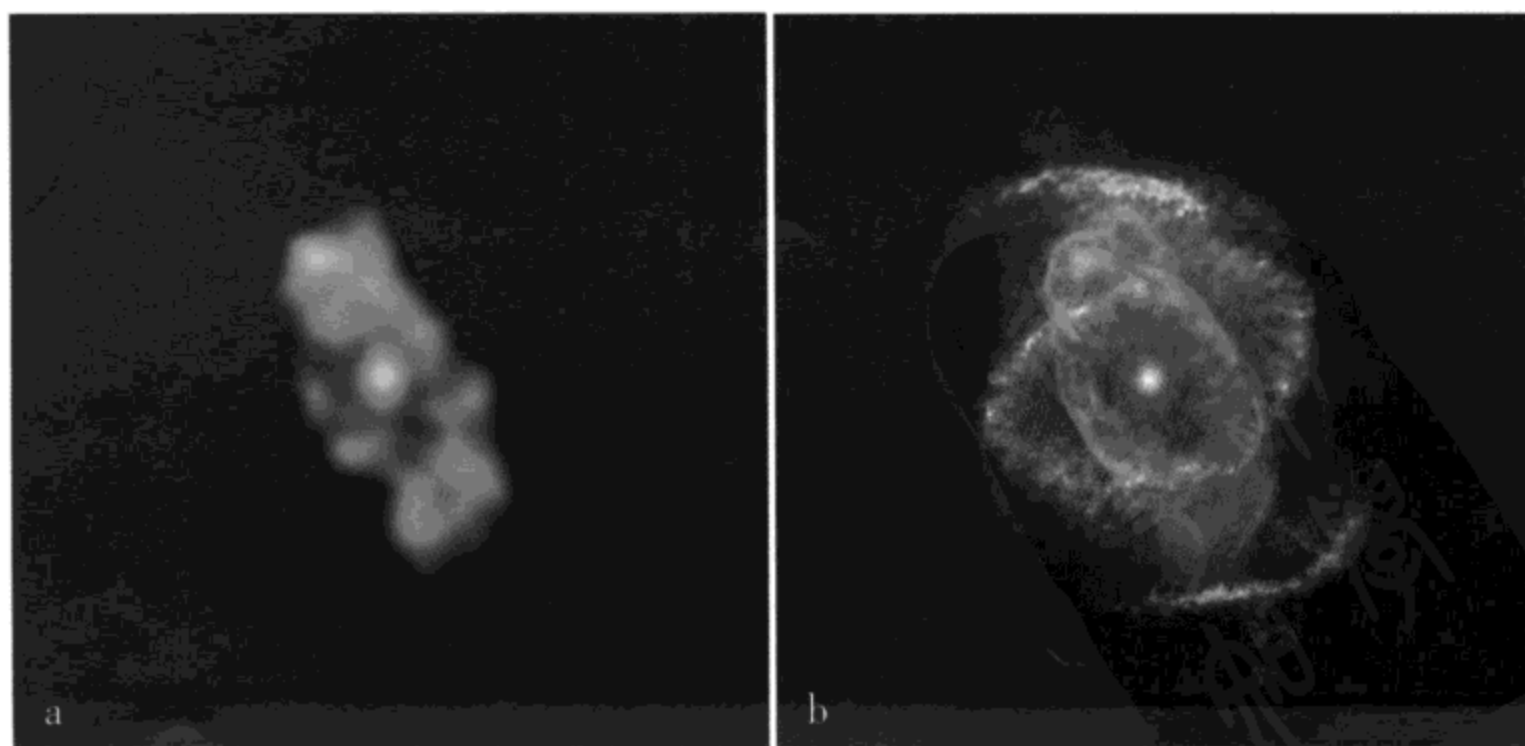


图 4.31 几千年以前，斯皮洛格拉夫 (Spirograph) 行星状星云 (IC 418) 中央的恒星才进入红巨星阶段并持续到现在 (图 a)。这颗恒星已抛出了其外层，现在看到的是它的炽热星核，它正在向空间发射紫外光，从而导致斯皮洛格拉夫行星状星云发光。斯皮洛格拉夫行星状星云复杂的交织结构仍是一个谜。显然，其中央恒星环境的某种东西造成了星云的线纹。图 b 为一颗正在死亡的恒星周围的膨胀气体云，它为南半球的业余天文学家所熟知，被称为“八暴星云”或“南环状星云”。膨胀的气体云直径近 0.5 光年，其中央有两颗恒星。亮而白的那颗恒星已接近自身死亡；而它的暗淡的邻居实际上是正在死亡的恒星，我们看见的星云正是它抛出的。图 c 是诨号为“爱斯基摩”的行星状星云，它有双环结构和发亮的条纹，看起来像一些尾部远离中央星的彗星。通过对该星云内部的云和气体的运动进行分析，科学家认为这颗正在死亡的热恒星仍在发出星风。大约 5000 年前，这颗恒星开始抛射物质并形成物质外环，内环是由于最近（仅约 1000 年前）的星风形成的。最终，星云将耗散到空间，而中央恒星将成为一颗白矮星安度长久的晚年。图 d 为小妖星云，它包围残存的星核，该星核向周围的气体射出强烈的紫外光。在该星云主体的外面，我们可以看到暗的物质束，那是恒星开始进入死亡时抛出的

全符合中等大小的恒星的死亡理论，也或许满足对称性的一些内需。然而，当天文学家陆续发现了另一些行星状星云时，对行星状星云的标准看法开始改变。作为对恒星演化的长期研究的一部分，天文学家已经用哈勃空间望远镜和其他地面高分辨望远镜重点观测几个不很对称星云的内部，揭示了多种形状和不对称情形。

很多行星状星云的（气体）壳有很复杂的图案，这引起了科学家关于伴星与正在死亡的白矮星之间的引力作用的各种争论。最复杂的一例是天龙座的猫眼星云。估计它至少已形成 1000 多年了。人们通过地面仪器对其长期进行了观测，但因它太暗淡而难以看出细节。哈勃空间望远镜对它进行了重点观测，发现了单向高速气体喷流、同心气体壳以及从中央区以每小时 600 万千米的速度流出气体的感生激波结。至少有一种理论认为猫眼星云中央的恒星是双星系统。中央星吹出的首批星风可能造成内气壳奇怪的椭球形状，包围内壳的是从该恒星吹出的两个较大的气体瓣。这种明亮的弧形和弯曲结构可能是由于很多似乎喷向不同方向的气体喷流所形成。很可能是两颗星相互绕转导致气体喷流摇摆不定，而这种作用像灯塔那样把喷流转过来和转过去。哈勃空间望远镜可以观测到较冷的气体，而钱德拉 X 射线天文台则注重观测星云中央的热气体，记录产生 X 射线的冷、热气体之间的碰撞证据。

图 4.32 猫眼星云是一个行星状星云，其“心脏”可能有一个双星系统。其中一颗恒星正在死亡，抛出它的大气，而双星相互绕转“舞蹈”的引力效应造成星云的复杂结构。猫眼星云的中央星将在几百万年内坍缩为一颗白矮星，但现在它的辐射正照亮周围的星云，使星云发出光和 X 射线。图 a 为钱德拉 X 射线天文台拍摄的猫眼星云。图 b 为用哈勃空间望远镜拍摄的各波段像合成的猫眼星云伪彩像，蓝色区（在图 a 的 X 射线像上的橘红色区）是发射 X 射线的热气体，而红色和绿色结构是很冷的



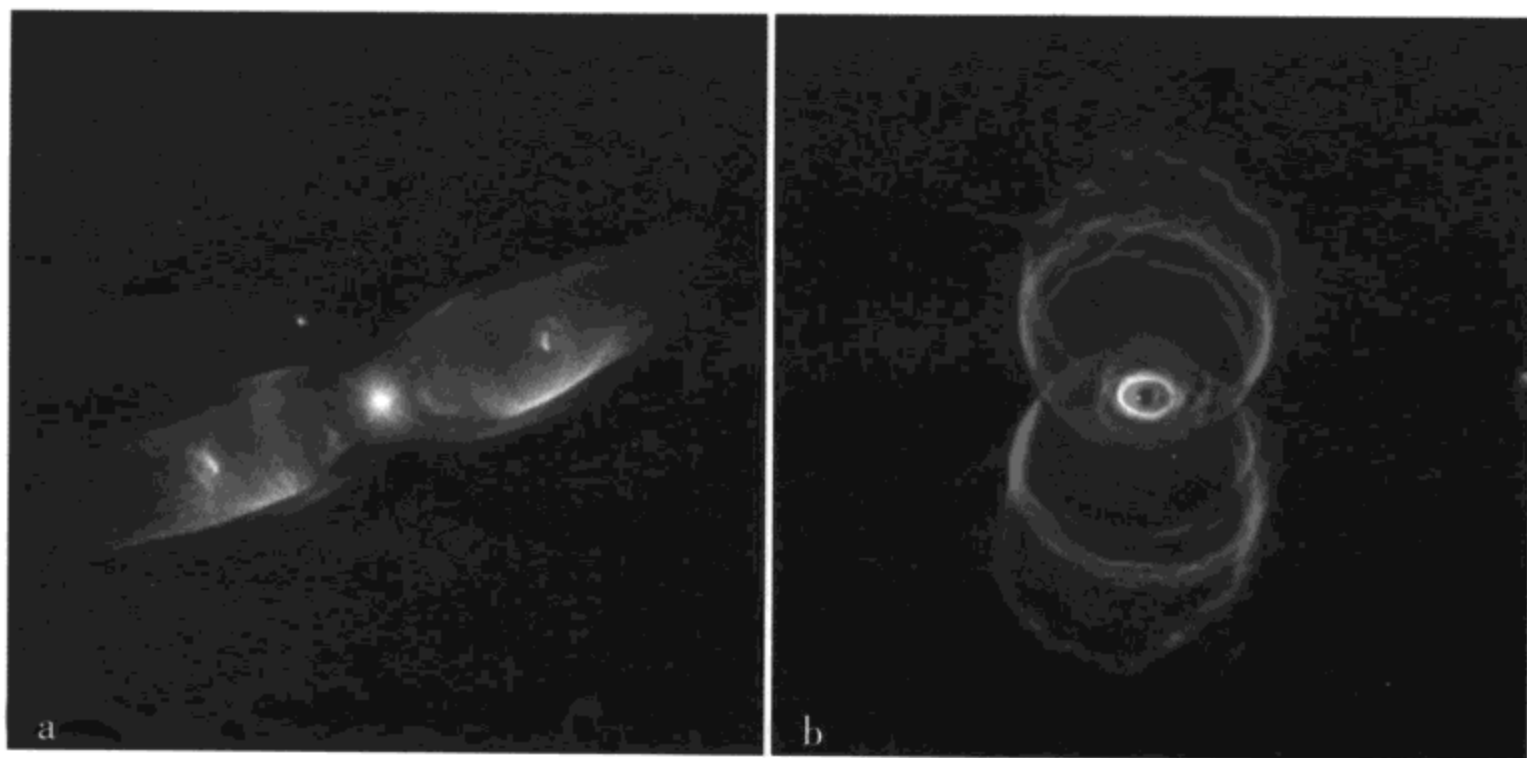


图 4.33 M2-9 是一个典型的蝴蝶星云或双极行星状星云 (图 a)。中央星是密近双星之一。一颗星的引力从另一颗星拉出气体并推到空间, 造成我们这里看到的双喷流“喷口”。图 b 为用哈勃空间望远镜拍摄的 MyCn 18 (沙漏星云, Etched Hourglass) 的可见光像。该星云的复杂而对称的结构或许是由从中央星外流的成束物质喷流与恒星演化先前吹出的气体碰撞所造成的

超新星

没有什么比一颗恒星临终成为超新星那一刻的灾难性爆炸更能吸引天文学家了。在这短暂而壮观的一刻, 恒星的亮度急剧而猛烈地暴增, 甚至超过了整个星系的光度。由于在恒星的演化过程中起着非常重要的作用, 超新星为天文学家们提供了研究星际物质在重元素方面所经历的环境、比铁重的元素的产生、中子星和黑洞的形成以及超新星对在附近的 H II 区 (图 4.1) 内形成新生恒星所可能起的作用的宝贵机会。

超新星爆炸的残余物散布到空间。分布最广且常被拍到的是帷幕星云, 也称天鹅环。它是一个巨大的气体发射区, 主要由星际物质组成, 是被爆炸的超新星的抛出物质吹胀起来的。由于膨胀的激波与周围的星际物质之间发生碰撞, 帷幕星云被激发而发光。帷幕星云也发出 X 射线。

超新星遗迹中最著名 (也是最早观测到的) 的是金牛座的蟹状星云。1054 年 7 月, 人们用肉眼就可以直接看到这颗超新星爆炸。在几个月的时间内, 这颗超新星昼夜可见, 直到亮度衰减、完全看不见为止。如果这颗恒星的爆炸发生在距地球只有几光年远的地方, 我们的太阳系就会受到爆炸射来的增强辐射以及高速 (或许速度是光速的一半) 高能粒子的危害。幸亏这次爆炸发生在距地球 6000 多

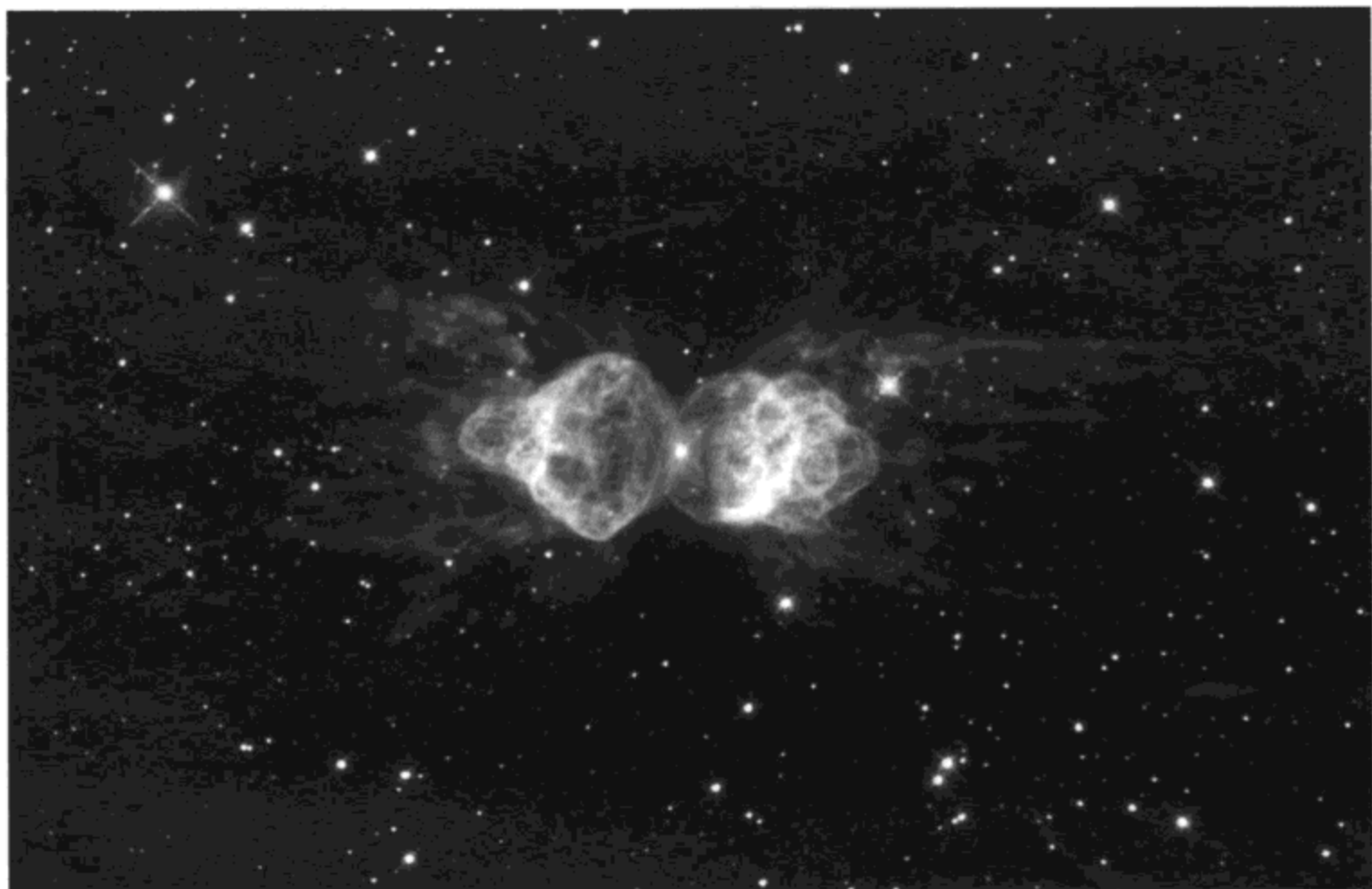


图 4.34 蚂蚁星云 (Menzel 3) 形似公园蚂蚁的头和胸。这幅由哈勃空间望远镜拍摄的蚂蚁星云的照片揭示了“蚂蚁的身体”像一对火焰瓣从正在死亡的类太阳中央星伸出来。这个纤细的行星状星云可能隐藏着第二颗暗弱的、围绕形成该星云的亮星作轨道运动的恒星。可能是该双星之间的相互作用决定了正成死亡的那颗星所抛射出来的物质流的形状，也可能是正在死亡的恒星自身的强磁场引导气体流向外部空间

光年处，但太阳系还是可能遭受了从那里射来的中微子的强烈轰击。全世界的史 122
书都对这次著名的恒星事件进行了记载，包括权威性的中国和日本的古籍中将这颗超新星记载为“客星”。有证据显示，当时居住在现在美国西南部的印度安人 (Anasazi Indian) 可能见过这颗超新星，并且在一处砂岩壁上做了记录。

现在，对于研究特大质量恒星爆炸死亡遗留物的天文学家来说，蟹状星云仍是极其有趣的研究对象。产生蟹状星云的超新星已成为一颗脉冲星——快速自转的中子星。由于中子星在自转和辐射喷流周期性地转向地球，它的信号每秒钟闪耀 30 次。电子在这颗脉冲星的强磁场中回旋，可能产生脉冲辐射。当这些粒子被转动的磁场驱入周围介质时，它们就辐射能量，造成星云发光。 124

超新星 1987a

虽然每年在遥远的各星系都会出现很多超新星，但在较近的亮星系看到超新星是非常罕见的。自 1987 年 1 月以来，大麦哲伦云（星系）的超新星 1987a 为

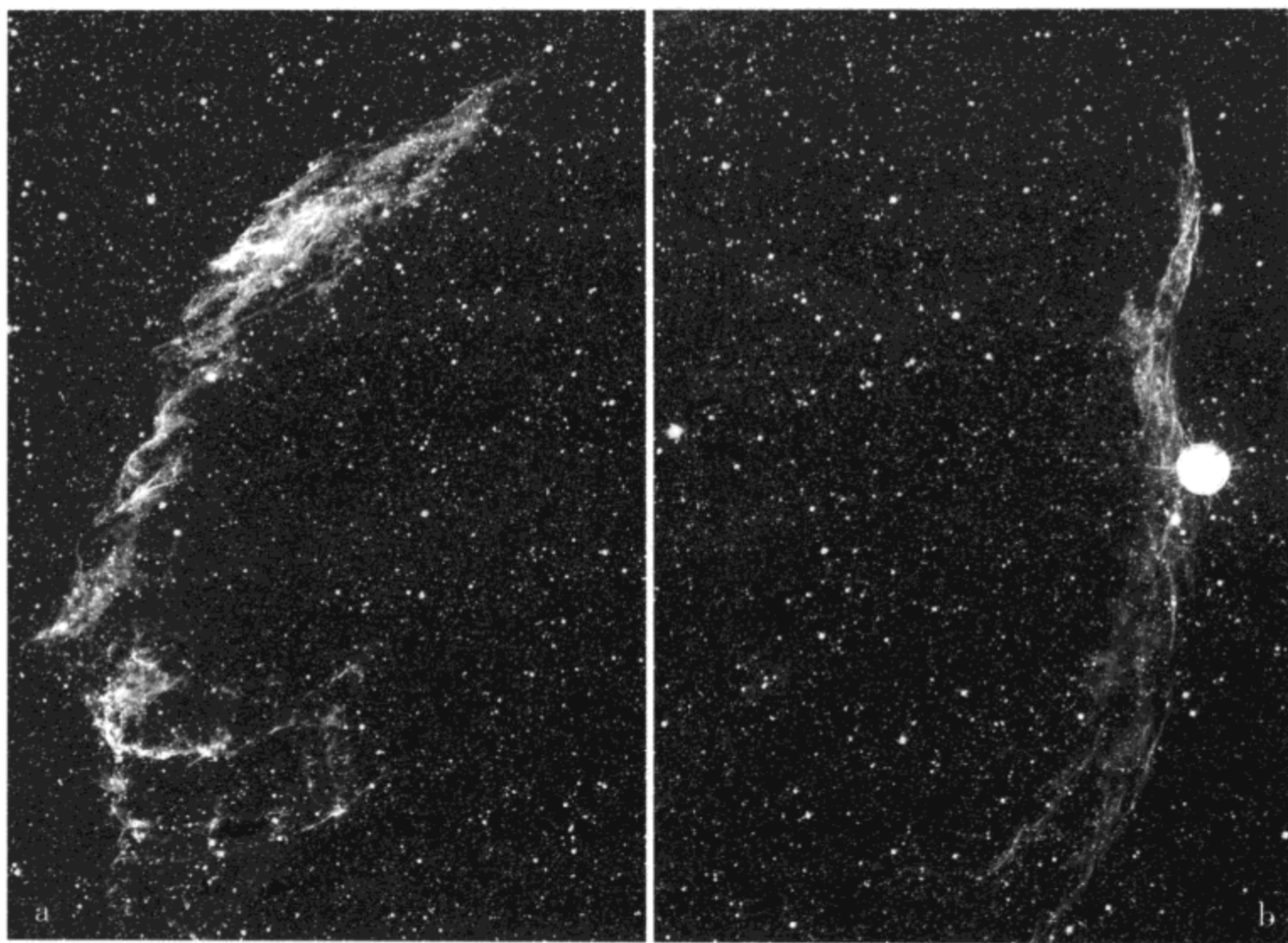


图 4.35 天鵝座帷幕星云的东半部 (图 a) 和西半部 (图 b)。它们是 2 万多年前爆炸的一颗大质量恒星的超新星遗迹

天文学家提供了观测一颗恒星死亡的绝妙机会和看到恒星爆炸后果的特殊机会。自哈勃空间望远镜在 1990 年 8 月第一次观测它以来，研究的重点放在了该超新星抛出的碎屑云。

离超新星 1987a 非常远的那个环似乎不太可能是它这次爆炸抛出的物质形成的，而很有可能是由于其前身恒星从前以星风的形式不断进行大范围物质抛射。在超新星 1987a 爆炸后的 240 天，正是这个早先被抛出的云环被来自此次爆炸的强光所照亮。假如这一理论成立的话，那么在超新星 1987a 的中心应当有颗脉冲星，但直到现在人们什么也没有探测到。有可能是这颗脉冲星发出的信号还没有穿过正在膨胀的碎屑云，因此我们探测不到。如果是这样，那发现这颗脉冲星就只是时间问题。也存在这样的可能：该恒星的残骸因为质量太大（大于 $3M_{\odot}$ ）就不成为中子星，而坍缩为黑洞。第三种可能性是，地球可能在脉冲星光束的视线范围之外，因此我们恰好看不到它。

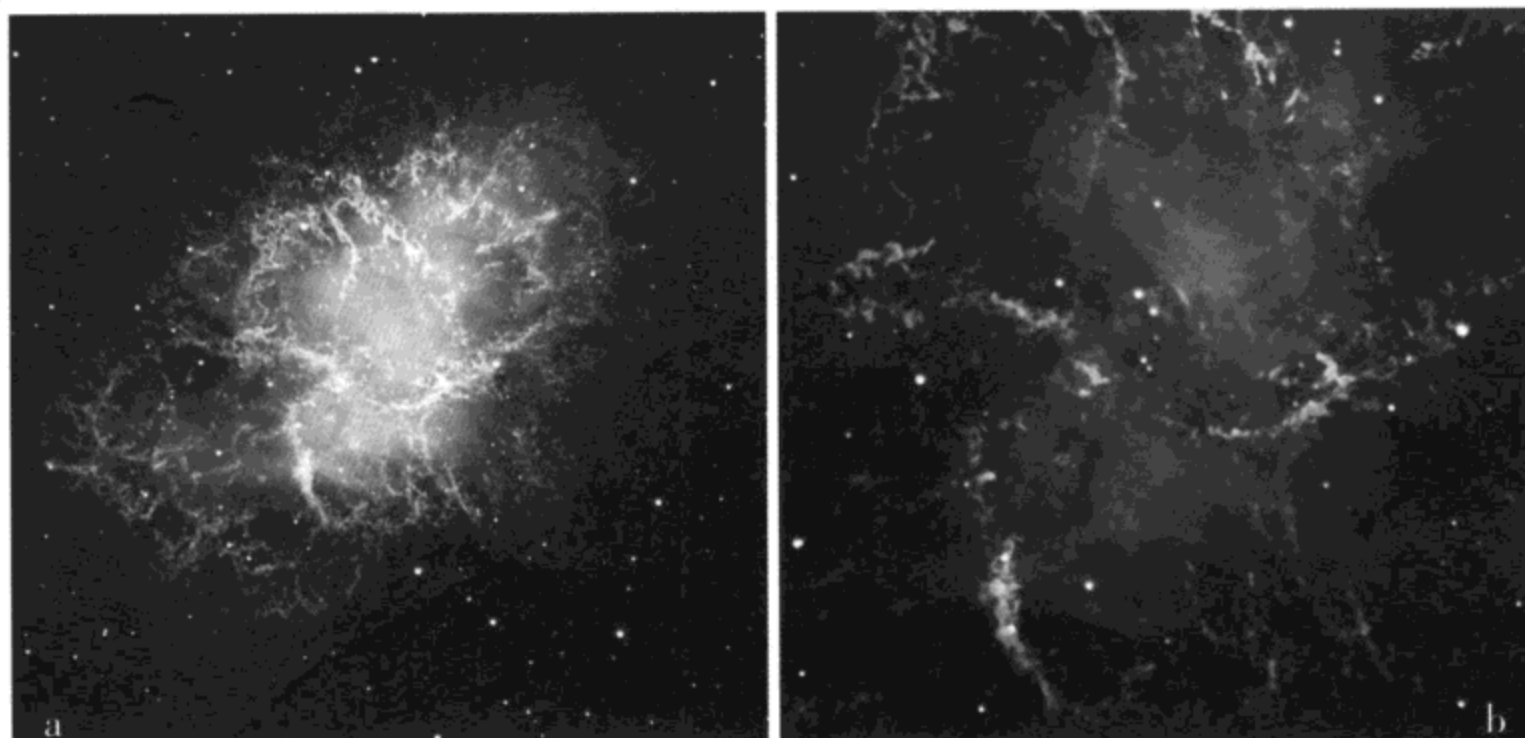


图 4.36 甚大望远镜在可见光波段拍摄的两幅蟹状星云像。图 a 为蟹状星云宽场像，图 b 为脉冲星所在的蟹状星云中心区局部放大像。蓝光为在大尺度磁场中回旋电子所发射，这些电子由快速自转的中子星（脉冲星）加速和抛出。这颗脉冲星是靠近蟹状星云中央的两颗临近星中在几何中心的那一颗

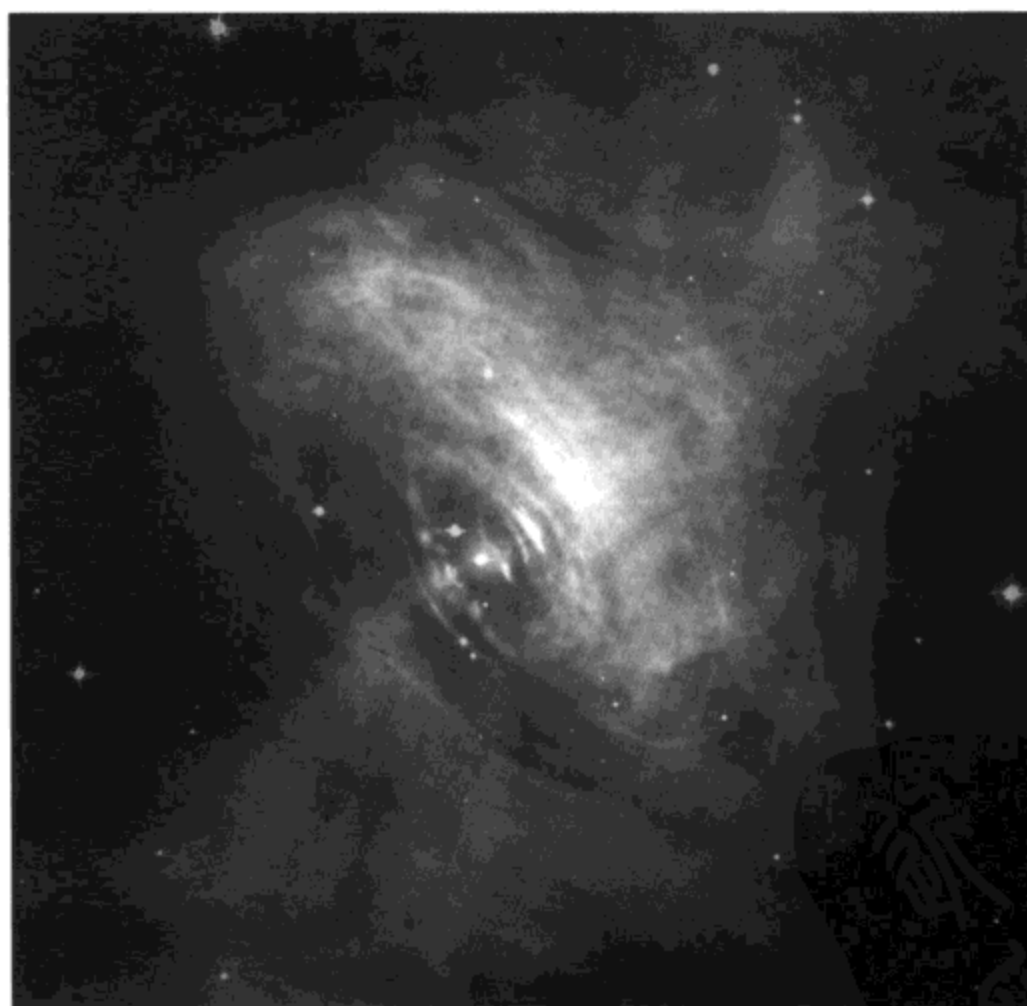


图 4.37 将哈勃空间望远镜拍摄的可见光像与钱德拉 X 射线天文台拍摄的 X 射线像进行合成，人们得到了这幅蟹状星云伪彩像。这幅像捕捉到了仍活着的物质，它们被星云中心的快速自转的中子星（脉冲星）所驱动，速度接近 $1/2$ 光速。一些明亮的细丝般的物质正快速地从膨胀环向外运动，在可见光像和 X 射线像都可看到。这些物质似乎源于内 X 射线环表现的激波。该环由 20 多个结组成，这些结形成、变亮和变暗、颤动，偶尔遭受引起粒子云的膨胀的暴发，但位置基本保持不变

图 4.38 设在智利托洛洛山 (Cerro Tololo) 的泛美天文台于大麦哲伦云超新星 1987a (图 a 中心右下方的亮星) 爆炸后第 3 天拍摄的照片。几年之后, 哈勃空间望远镜拍摄到了被这颗恒星正在死亡时的辐射照亮的、正在膨胀的碎屑环 (图 b, 下页)。现在要寻找的是大质量恒星坍缩处的一颗脉冲星



125 船底座 η 激变变星

银河系有很多称为激变变星的恒星, 它们是较大类型的变星或不稳定星的一部分, 因此我们就以一颗尚未完全死亡的有趣恒星来结束关于恒星死亡的讨论。它就是船底座 η 星。我们足以相信这颗明亮蓝星处于死亡的阵痛中。它是一颗大质量、不稳定的较年轻的恒星, 向周围空间抛出大量物质。我们现在看到的是一个快速膨胀的气壳, 它以类似瓣的结构从中央星向外扩张。该恒星从内部以每小时超过 300 万千米的速度抛出快速运动的氮和其他气体, 它们的光使气壳呈微红色。亮白物质富含尘埃, 它们把星光反射到我们。天文学家仍试图解释船底座 η 星行为的动力机制。它的终极命运是作为超新星爆炸, 但除了它的形貌外, 它还有少许显示将成为超新星爆炸的特性。这颗激变变星的剧烈爆炸使我们很想知道它真的爆炸时会是什么样子。

127 船底座 η 星周围的星云内含有正在形成下一代恒星的温床。船底座 η 星产生的激波几乎肯定会引发更大规模的恒星诞生, 这将是发生在银河系各处的恒星死亡与恒星诞生轮回的精彩范例。

128 γ 射线暴之谜

超新星并不是星空剧烈爆发的唯一明亮天体。天文学家早已知道明亮的 γ 射线暴, 但困惑的是不知道是哪种天体在短时间内能够辐射如此巨大的能量。我们在第 1 章曾谈到, γ 射线是最高能量的辐射——至少是可见光能量的 10 万倍。



的确，产生 γ 辐射的必须是很高能的天体！20 世纪 60 年代中期，美国发射了一连串人造卫星（Vela）侦测前苏联的秘密核试验，却意外地第一次发现了宇宙 γ 射线暴。近几十年来，很多探测器陆续升空，就是为了搜寻星空中的 γ 射线暴的来源，其中包括尤利西斯号探测器、康普顿 γ 射线天文台、X 射线计时探测器、BeppoSAX 卫星。

根据通过这些探测得到的资料，天文学家对 γ 射线暴（或 GRBs——天文学家对它们的简称）的来源做出了几种一般推测。关键问题是：这些 γ 射线暴是来



图 4.39 船底座星云（其中心是船底座 η 星）的可见光像。这是经几次感光合成的,捕获到了电离的（加热的）氧气体、氢气体和硫发射的光。船底座 η 星在该星云中两颗亮星的左下方、靠近图中心处

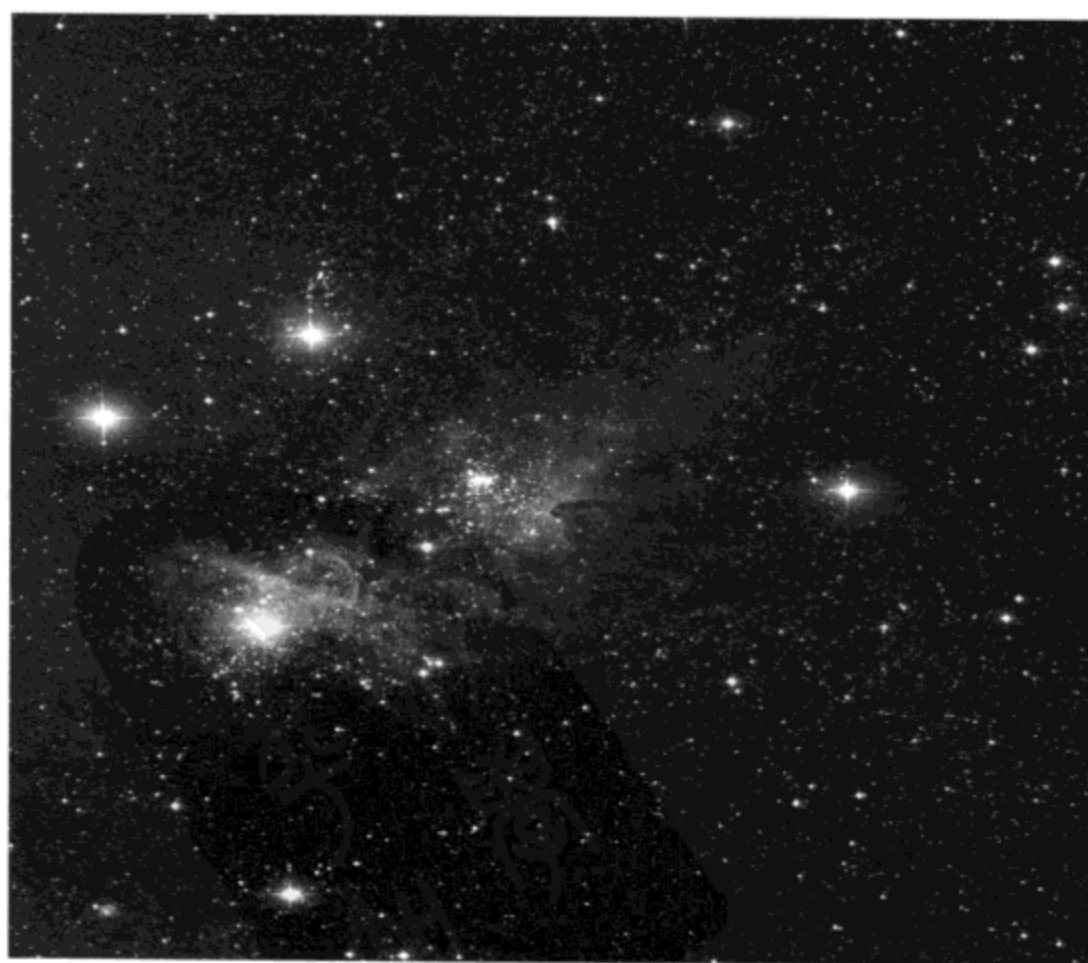


图 4.40 船底座 η 星云的红外像。船底座 η 星云位于上方云雾体的左下方，请与图 4.39 对照

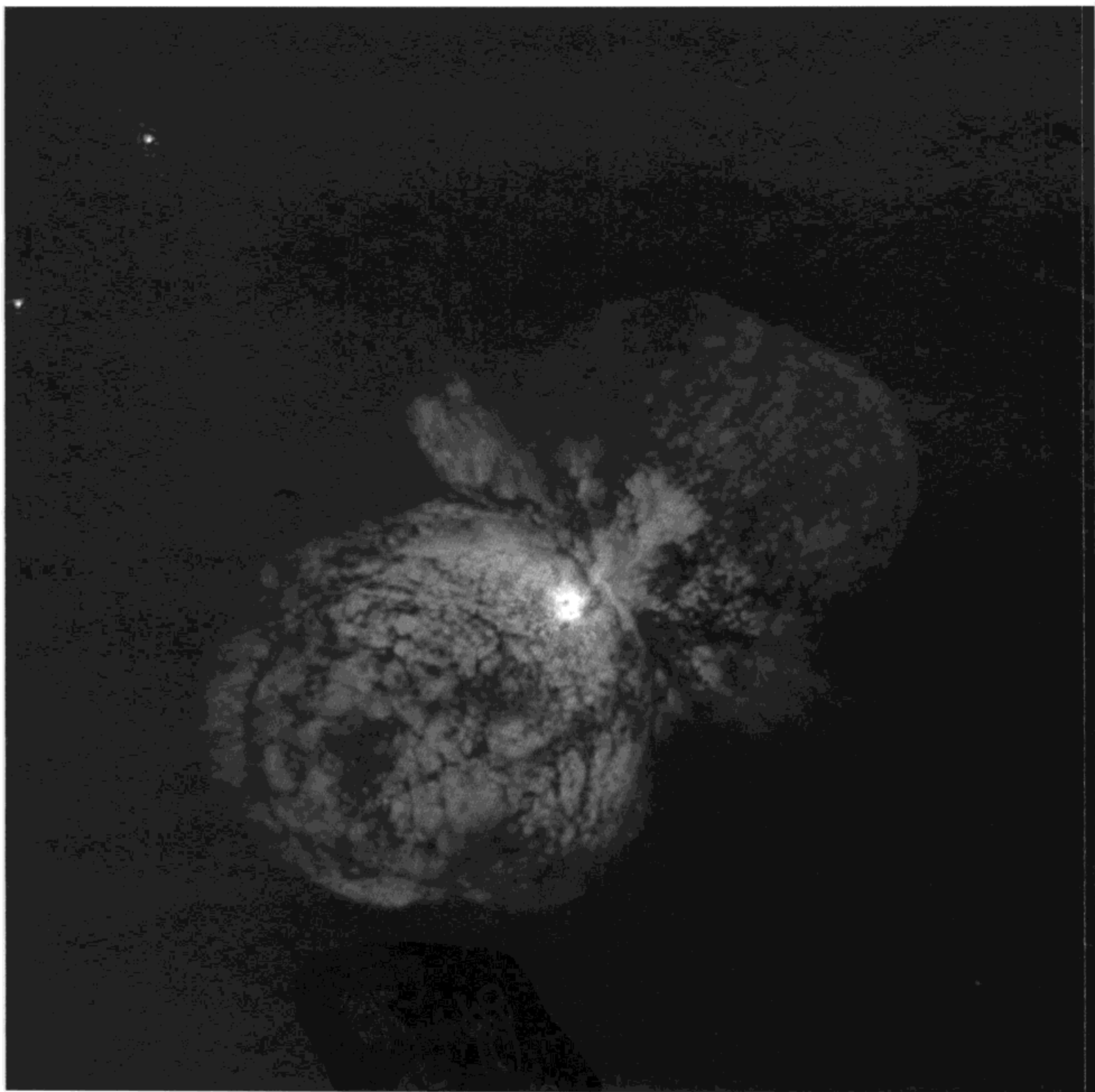


图 4.41 哈勃空间望远镜拍摄到的船底座 η 星 (云)。即使它远在 8000 光年之外，我们也可以看到这个与太阳系大小相当的膨胀星云的结构

自我们银河系的某种天体还是来自位于其他星系的天体？累计的观测计数是每天约 3 次 γ 射线暴，它们来自太空各个方向。这至少有利于某些 γ 射线暴来自于别的、更遥远星系的看法。

一般地说， γ 射线暴在 0.1 秒内就升到最大强度。如此之快就产生辐射的天体，其大小不可能超过光在 0.1 秒内穿越的距离，这就意味着 γ 射线暴的暴源的大小仅仅是几万千米。真是几乎不可想象的小，而且在很短时间又是异常的亮。

129 对于 γ 射线暴暴源的位置曾有过短暂的争议，但最近的资料解决了这个问题。原来， γ 射线暴源几乎肯定在 30 亿~100 亿光年以远的地方。对于如此遥远的暴源来说，天文学家估计，一次 γ 射线暴必定是暴源向各个方向释放出 10^{53} 或 10^{54} 尔格的能量（天文学家称为“各向同性发射”）。要知道，太阳每秒钟辐射的能量（这称为太阳光度）约为 4×10^{33} 尔格。也就是说，太阳以这样的光度辐射 70 亿年的总能量才相当于 γ 射线暴源在不到 1 秒钟内辐射的能量！如此巨大能量的产生意味着我们的宇宙中有特大火球（译注：假如 γ 射线暴的暴源就在太阳系附近，那么，我们地球就会遭受灭顶之灾），我们可真的不能小看这样的事情。是的，它们就出现在那里——每天产生 3 次 γ 射线暴。显然，关于这些 γ 射线暴的暴源究竟是什么，天文学家还必须进行艰辛的探索。

或许， γ 射线暴的暴源向各个方向都释放出巨大能量的看法不正确。也许 γ 射线暴的暴源是一个具有能以喷流波束的形式、以每秒 10^{51} 尔格的强度发射能量的致密中央“引擎（发动机）”的天体。另一种观点也认为 γ 射线暴的暴源释放出的能量非常大，但比上面的数值（ 10^{53} 或 10^{54} 尔格）更切实际。天文学家就可

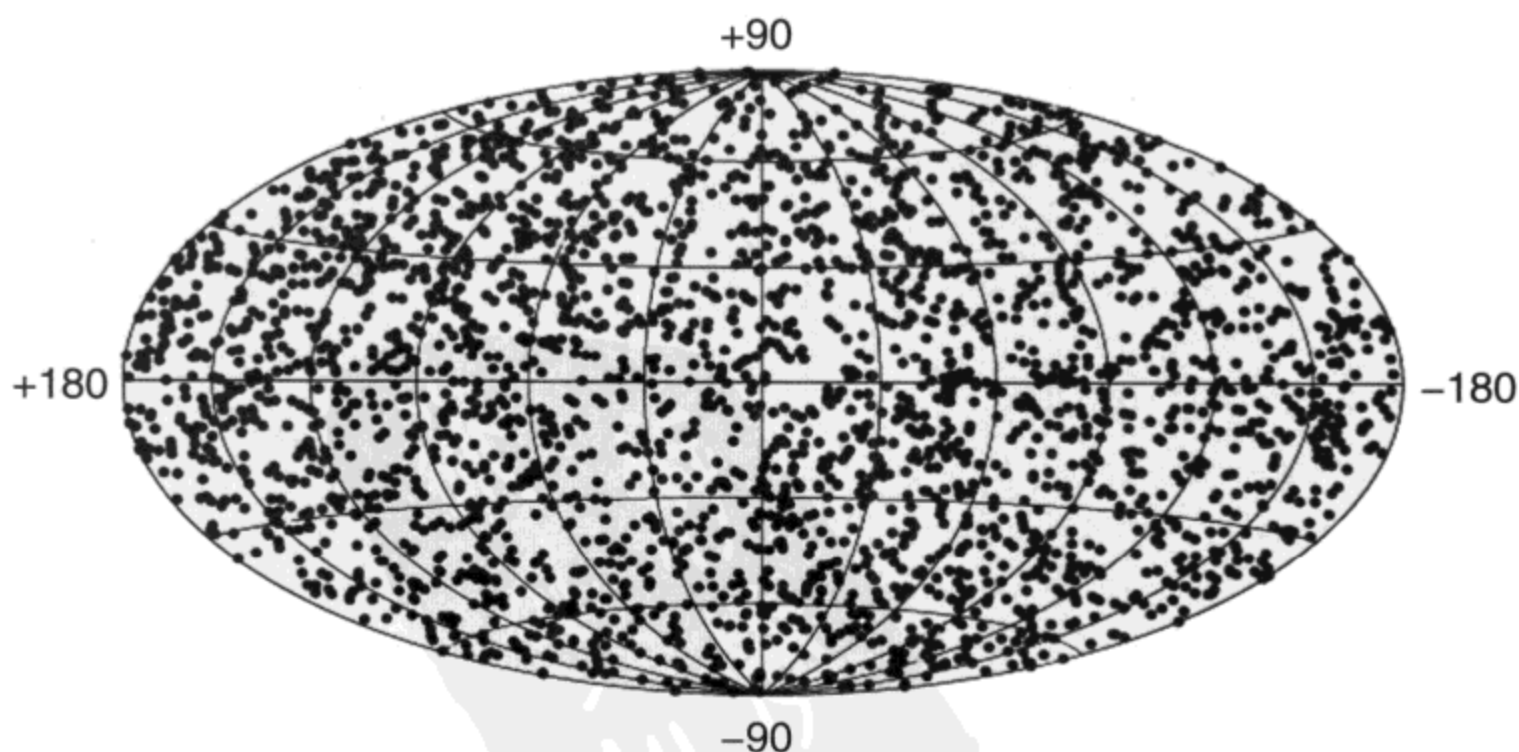


图 4.42 这幅 γ 射线暴的全天分布图是根据康普顿 γ 射线天文台观测到的数据绘制的。 γ 射线似乎遍布全天，这意味着它们可能是从河外星系的暴源发射来的。坐标系指的是银经和银纬



图 4.43 哈勃空间望远镜在 1997 年 6 月观测到了 γ 射线暴正在衰退的“余辉”。对于这些遥远的“烟火”爆炸，天文学家提出了从中子星碰撞到某些与星系有关的现象等几种解释

以考虑两类天体。一种看法是， γ 射线暴是由中子星或者黑洞的相互碰撞产生的，两个这样大质量的天体撞到一起会产生特别巨大的能量。另一种可能性是，所有的星系中都有能辐射巨大能量的某类激烈天体。

天文学家甚至不囿于一种解释，而是继续监测星空的这些高能“怪兽”。天文学家通过可见光波段观测对暴源进行准确定位，并跟踪监测暴源的演化，包括 γ 射线暴发生后衰退的余辉。这类工作常常是通过太空中的 γ 射线探测器、X 射线探测器、光学观测探测器与地面的光学望远镜、射电望远镜之间的协作进行的。例如，1997 年 2 月 28 日，意大利-荷兰卫星 BeppoSAX 卫星探测到猎户座方向一次 3 分钟长的 γ 射线暴，它被命名为 GRB 970228。很自然地，这引起了天文学家们的高度重视。哈勃空间望远镜对准 γ 射线暴的发生地，在可见光波段拍摄到了该火球（暴源）的像。看来暴源似乎位于某个星系之中。随后的观测主要集中在暴源的余辉。

1997 年 5 月 8 日，BeppoSAX 卫星探测到另一次 γ 射线暴，哈勃空间望远镜的成像摄谱仪（STIS）在 6 月 2 日拍摄到了它的余辉的照片（图 4.43）。在照片的中央，可以看到衰退的火球，但没有看到它的寄生星系。假如这个寄生星系确实存在，那它也比银河系暗得多。

假如一个 γ 射线暴是暴源以一定的张角向某个方向释放能量束流，我们就不会总是观测到，因为能量束流不会总是恰巧指向我们，但我们可能看到 γ 射线暴的遗孤余辉——这样一次 γ 射线暴事件的衰退辉光。假如这种模型是正确的，那么很多暴源可能没有指向我们。这就意味着 γ 射线暴暴源的数目比我们实际观测到的数目大 500 倍，而“遗孤”余辉则应更常见。到现在为止，余辉仍是罕见的。预料 γ 射线暴的出现频率是每个星系每 10 万年一次，因此，看起来似乎需要调整一下能量束流模型，以便能完全解释这些难以理解的 γ 射线暴。

有关 γ 射线暴的暴源及其不被观测到的原因，天文研究工作正在取得飞速进展。现在，某些研究者认为有两类不同的 γ 射线暴。假如 γ 射线暴是两个中子星合并的结果或者是某种“怪兽”，对于我们银河系和其他星系都会是很有趣的。因为它们对电视新闻说：“马上插播！”



天文学是广阔空间的和谐科学。

——罗素 (Lord John Russell)

我们最难观测的星系就是我们所在的银河系。我们远离中心……我们处于一个旋臂上，尘埃阻碍我们观测。换言之，我们在大雾天处于城郊的矮屋顶上。

——阿西莫夫 (Isaac Asimov)

星系好比是恒星的城市，又像是宇宙的雪花飘荡于太空。没有两个星系是完全一样的。一个星系的一幅图像就是它“冻结”在那一瞬间的快照。传递天体信息的光线要经过一定的时间才到达我们这里，所以我们看到的实际上是天体过去的情况。星系是恒星集团，距离遥远，这不利于天文学家研究它们结构的长期演变。由于星系的一生可能要追溯到宇宙最早期，也很难观测到星系结构如何演化，因此，如同对恒星的研究方法一样，我们必须观测或近或远的很多不同星系，去了解它们怎样形成和它们怎样随着时间演化。

银河系的恒星密集带（银河）给我们有关星系的第一手线索，而且使我们处于非常有利的地位。我们在从侧向看“我们的自己的星系”，这种看法可能仍然使某些人极为震惊。自人类诞生以来，横越星空的银河星带就在人们心中引起惊奇和疑虑。每种文化都给它一个意味深长的名字，诸如乳汁路、黑夜的骨架、天河、星灵路以及很多其他名字。直到伽利略把他的望远镜对准银河，看出它是由密密麻麻的恒星组成的，天文学家才真正认识到它是恒星集团。直到 20 世纪，天文学家才测定银河系的形状和大小。

多年来，描述星系的一些惯用词汇造成历史上的混淆，不能表示它们实际上是什么。术语“星云”惯用于任何外观呈弥漫状但显然不是恒星的而似云结构的

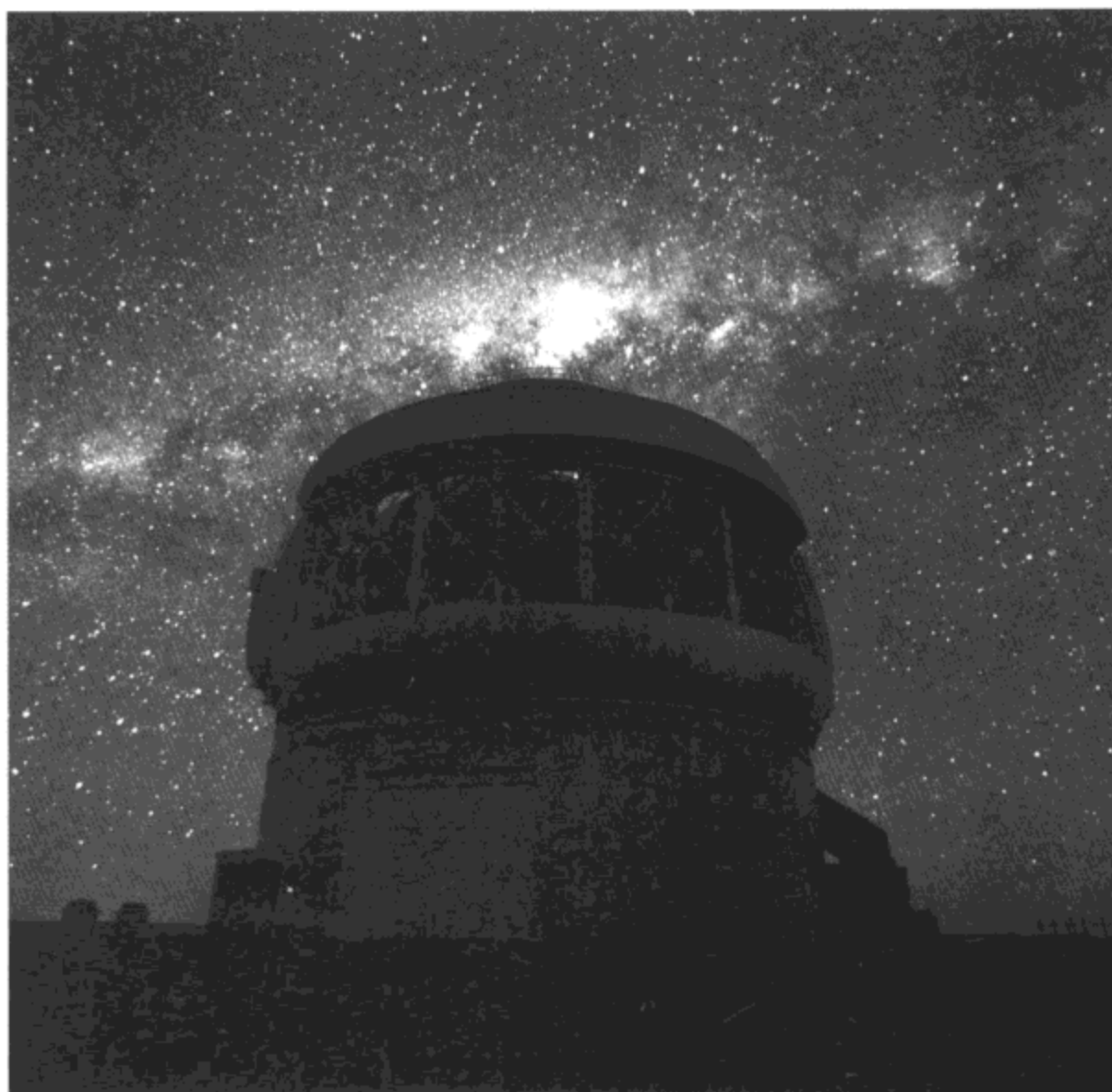


图 5.1 从地球（银河系内部）观测，银河系表现为横越星空的一条星带

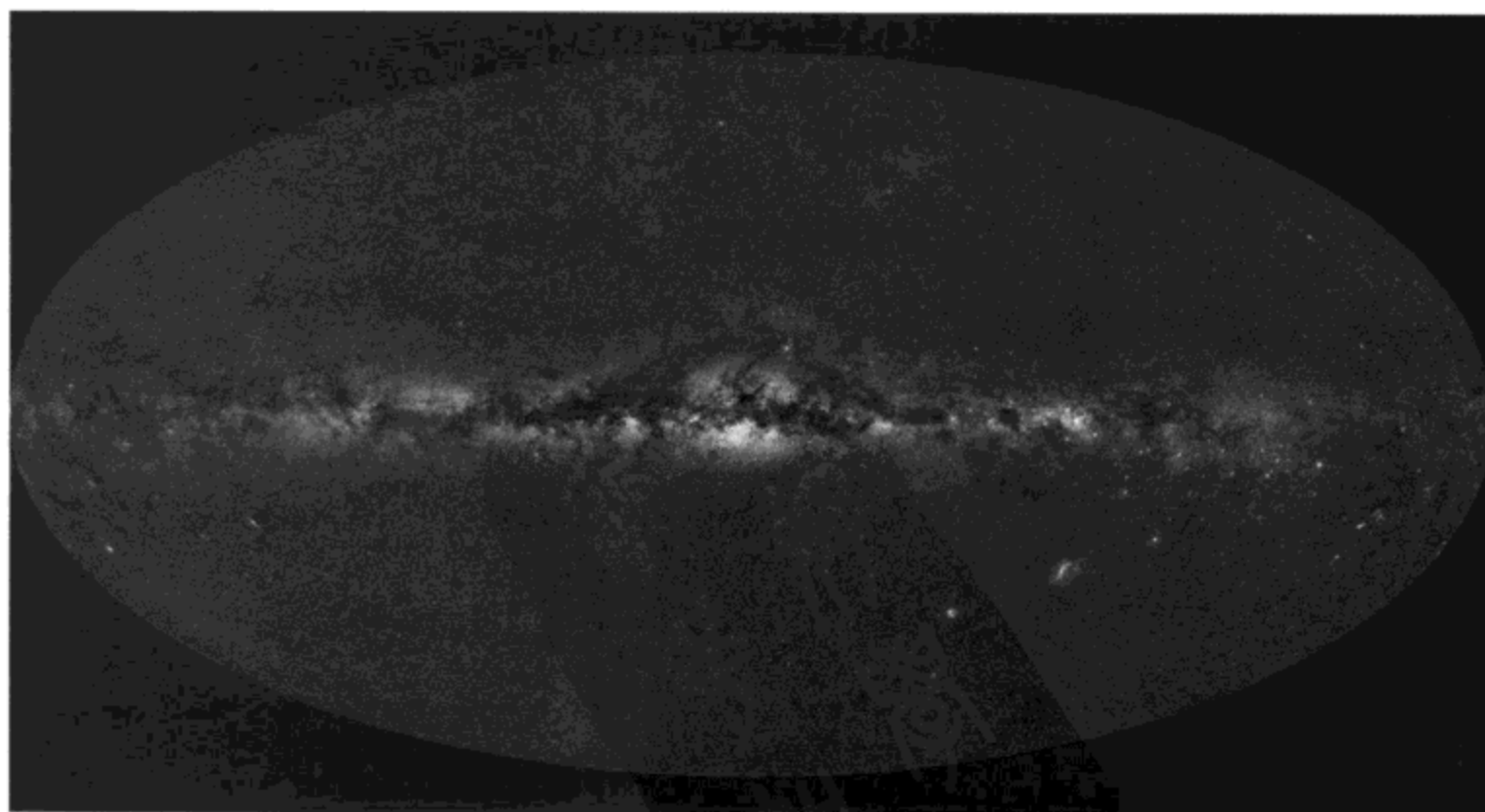


图 5.2 银河的彩色组合像揭示星团、气体-尘埃带、明亮发光中心的位置。右下的两个不规则亮片是大、小麦哲伦云（银河系的伴星系）

图 5.3 银河系中心方向穿越 25000 光年空间的红外伪彩像，揭示了银核（那里可能隐匿一个超大质量黑洞）周围已被加热的气体-尘埃云的位置。如果在可见光波段观测这个方向，大多数恒星就会被很厚的尘埃云遮挡在后面而看不见。而在红外波段下，模糊不清的尘埃变得透明了

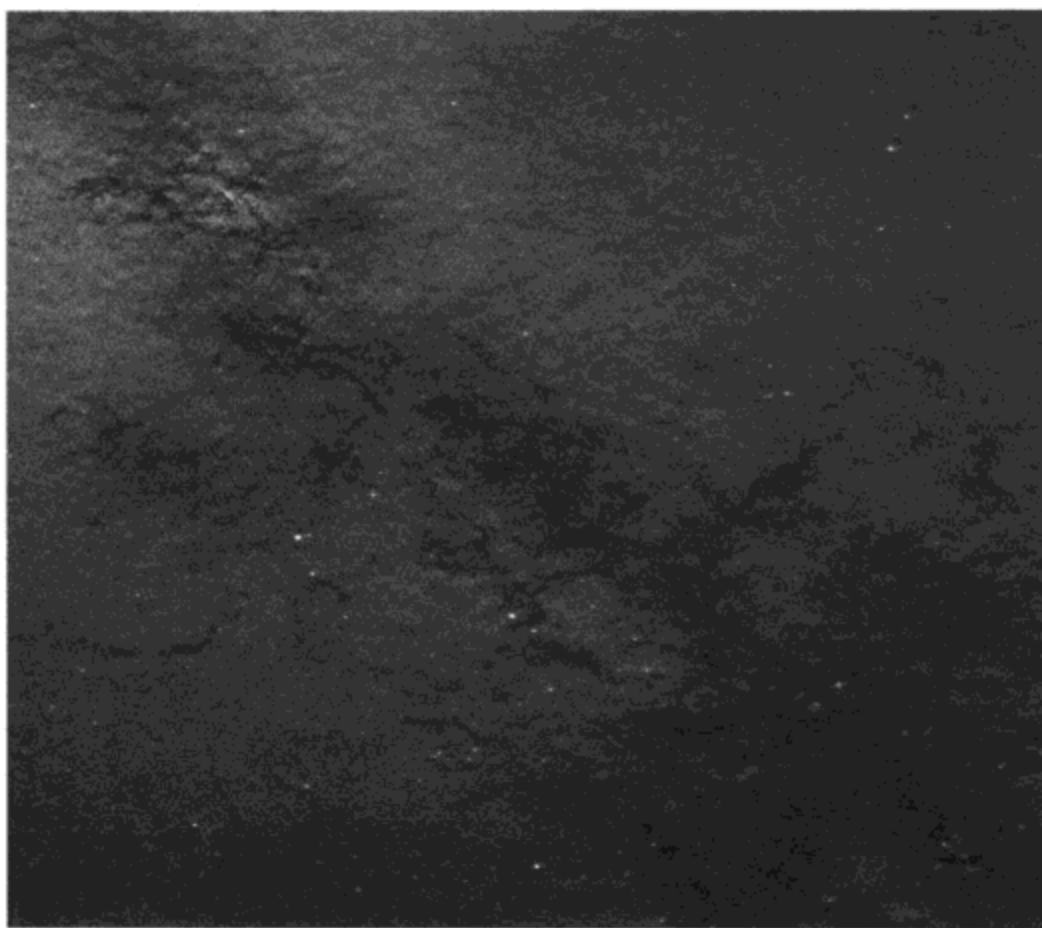
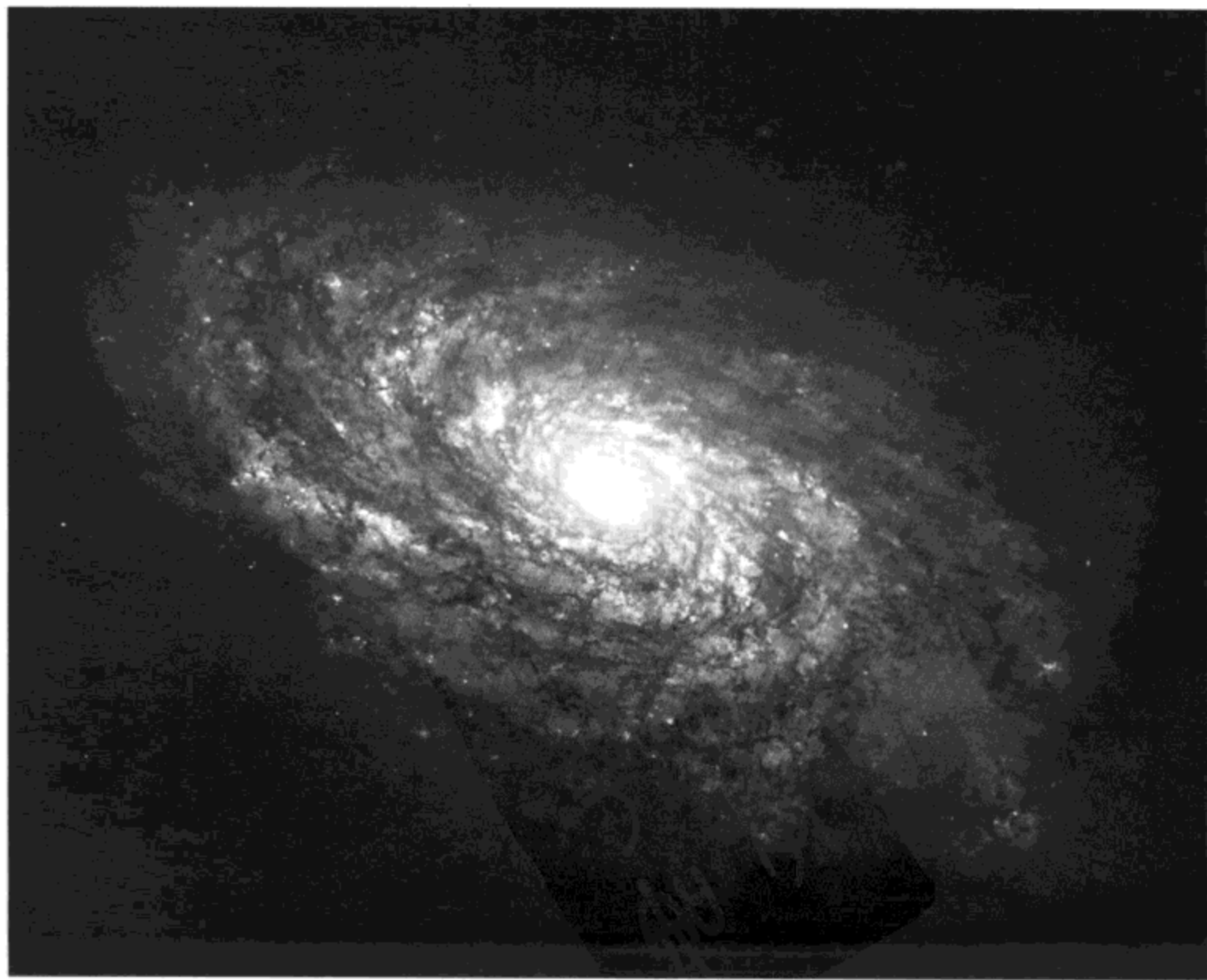


图 5.4 宏大的旋涡星系 NGC 4414 离我们约 6000 万光年，位于后发星座。它的中心区主要含较老的黄色恒星和红色恒星。外旋臂是年轻的蓝星所在地，可以看到单颗的最亮蓝星。旋臂上还有许多星际尘埃云，它们是下一代恒星的诞生地



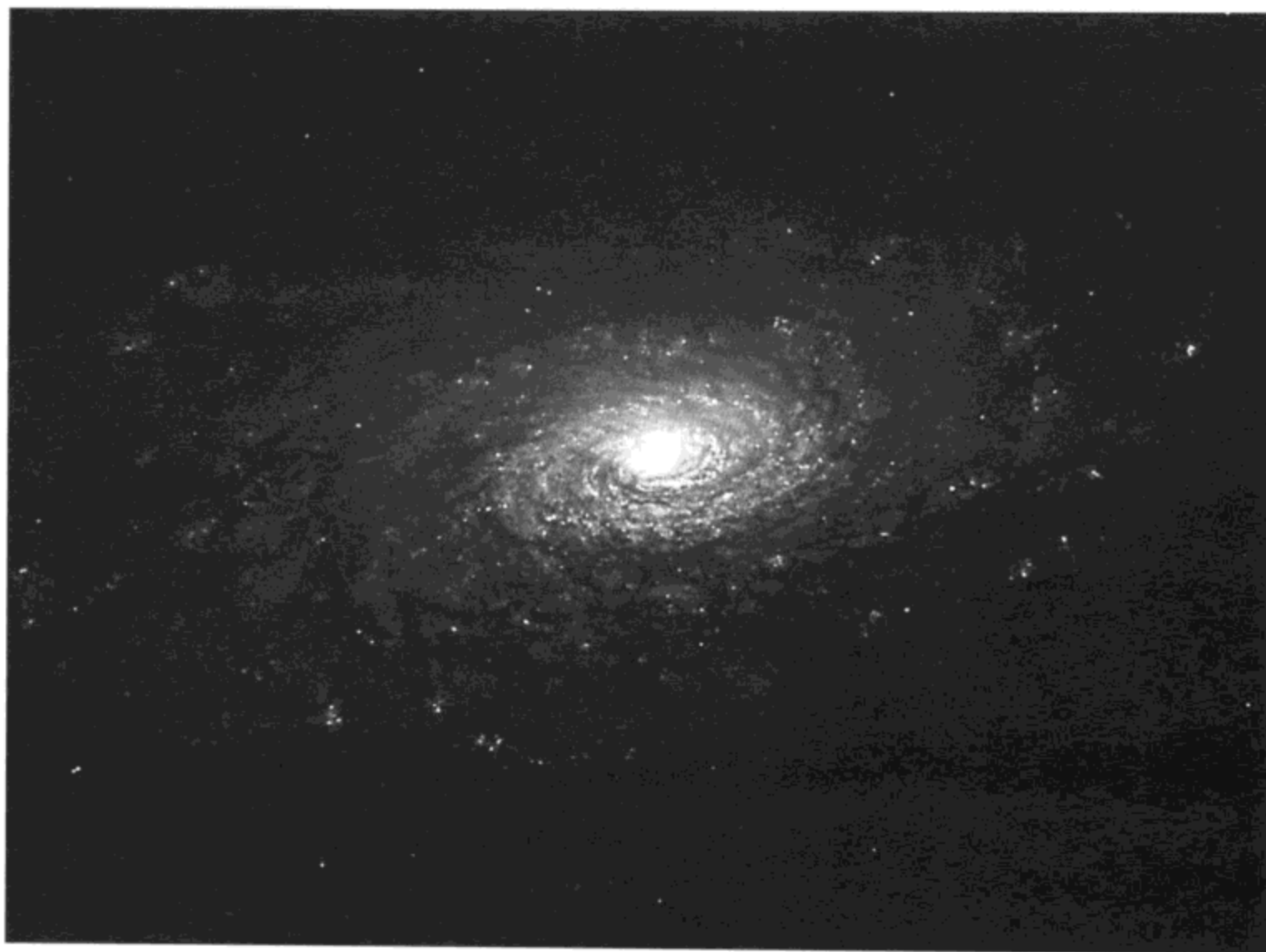


图 5.5 “向日葵星系”离地球 3600 万光年，位于猎犬星座（大熊星座附近）。类似于其他旋涡星系，它有很多（恒星诞生）的结和气体-尘埃云（幼年恒星的摇篮）。这幅像清晰地显示了该星系的紧绕旋臂和很多微红的小 H II 区，在 H II 区中，氢气体因新形成的大质量热星照射而发光

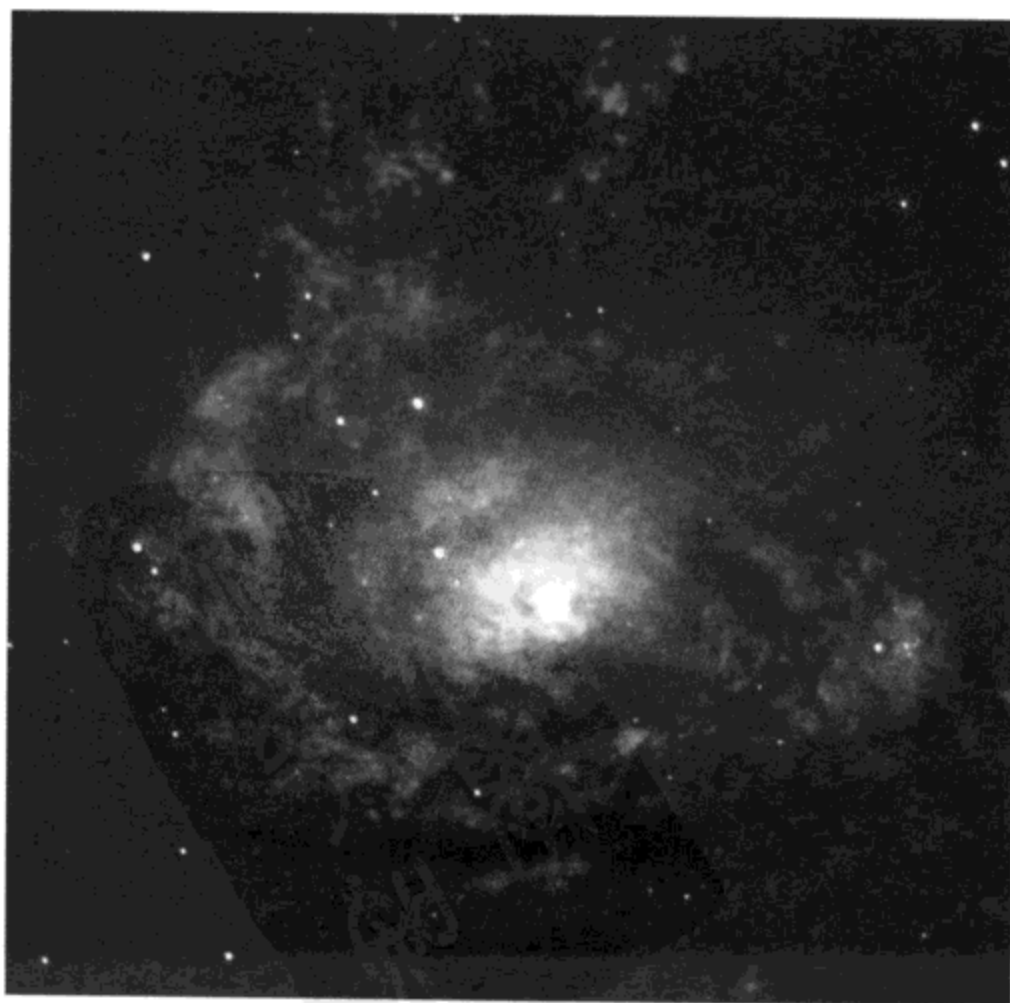


图 5.6 这是南半球的圆规星座的一个星系，它属于一种最常见的旋涡星系类。这类星系有致密的活动星系核，并且人们相信它们含有大质量的黑洞。人们探测到在这类星系的中心区以高速度向空间吹出超热气体。研究此星系的天文学家正在观测强烈辐射的证据，这样的辐射加热了该星系的其余部分，从而形成在可见光和红外波段均可看到的光辉

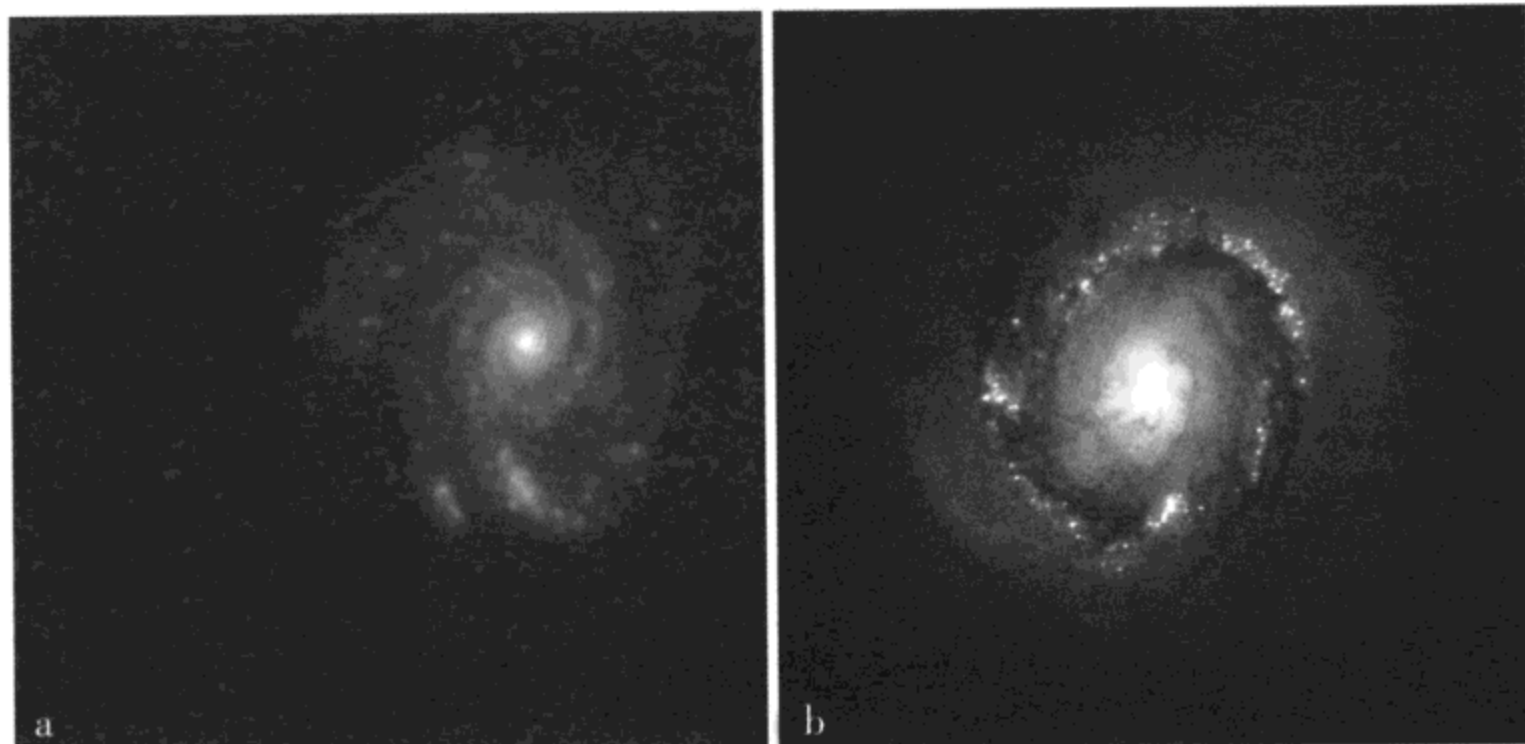


图 5.7 图 a: 恒星诞生区的氢气体云发射出的暗淡的红外辉光穿过了旋涡星系 NGC 5653 中心区周围多尘的星云。一些红色结描绘它的弯曲旋臂，表示有许多恒星正在形成的区域，那里的新生大质量恒星正在发射紫外辐射而加热星云。中等年龄的恒星和星团显示为白光，暗的物质是尘埃。图 b: 棒旋星系 NGC 4314 的紫外光像、蓝光像、可见光像、红外光像和特殊的氢 ($H\alpha$) 滤光像的合成像。紫色代表正在被年轻星团激发的氢气体。在星系核周围的一个星系环内，一些幼年星团正在形成，这里是该星系内恒星形成的唯一场所

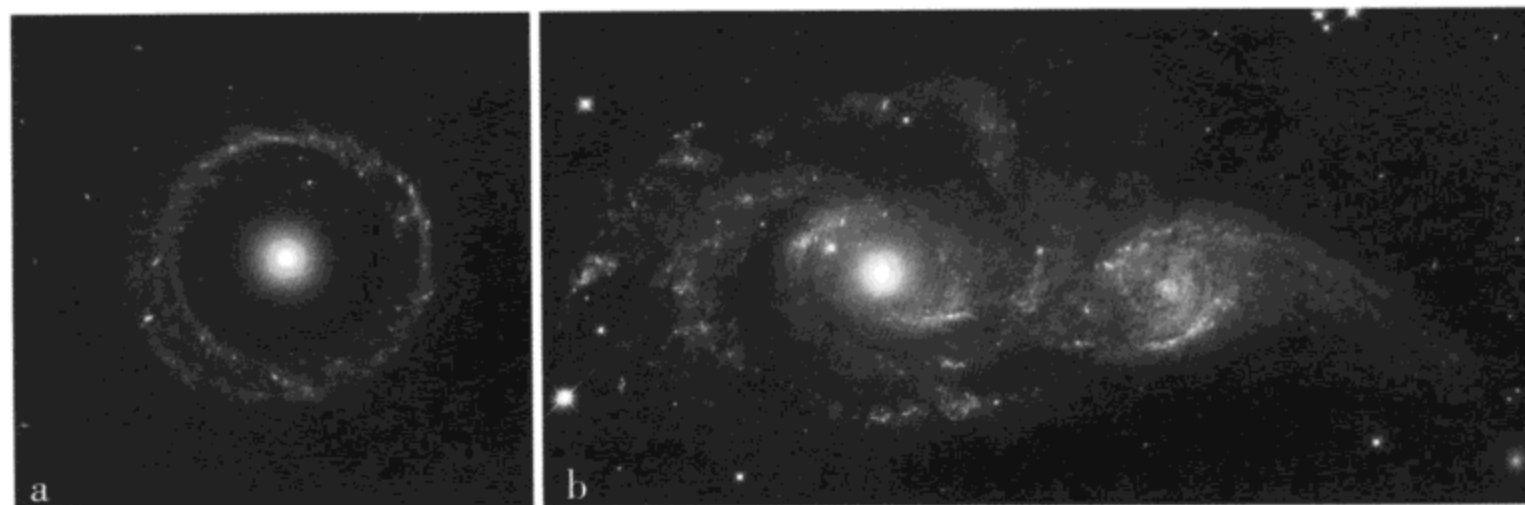


图 5.8 图 a: 一个近乎完美的炽热蓝色星系环围绕一个奇特郝格天体 (Hoag's Object) 的黄色星系核。整个星系约 12 万光年宽，大致与我们的银河系同样大小。蓝色星系环主要由一群年轻的大质量恒星组成，明显地与由主要由古老的恒星组成的黄色星系核不同。似乎两者之间的“间隙”可能含有一些暗的星团。在遥远的过去，郝格天体 (图 b) 是否像我们现在看到的这幅像？两个旋涡星系像夜间两艘豪华轮船擦肩而过那样不期而遇，较大的星系 (NGC 2207) 以其强引力破坏较小的星系 (IC 2463)。从图像上看，恒星和气体形成一条细长的带子，延伸 10 万光年。天文学家认为，在非常长的一段时间内，这样的星系之间的亲密接触会一直继续下去

图 5.9 绰号“蝌蚪”的星系 NGC 10214 离地球 4.2 亿光年，位于天龙星座。可能有一个小的致密星系与此星系（在“蝌蚪”头部）近距离相遇，从而形成现在的扭曲形状。这次星系之间的亲密接触形成的强大引力使由气体和新生星团组成的“蝌蚪”长尾延伸 28 万多光年。这些星团最终会成为古老的球状星团，类似于人们所发现的、盘旋在银河系晕的古老的球状星团。在“蝌蚪”尾巴上的两丛最亮星可能会变为相伴的矮星系。在更遥远的星系，这样的星系之间的相互作用及其所导致的“恒星诞生大潮”也在进行着



图 5.10 草帽星系 (M104, NGC 4594) 因其形态像平檐墨西哥帽而得名，它离我们约 5000 万光年远，位于室女星座。很多球状星团拥挤在它的中央核球附近。这幅像揭示了它精细的旋涡结构。我们几乎在侧视它，甚至用小望远镜也可以看出它的奇特形状

天体。事实上，18 世纪著名的天文学家梅西叶（Charles Messier）编写了著名的梅西叶弥漫天体表（这是某些天体用字母“M”和阿拉伯数字代表的起因），以便于彗星搜寻者不至于把彗星跟星空中永久存在的星云相混淆。在 20 世纪前期，关于那些外观呈弥漫状的天体和“旋涡星云”究竟是银河系内的还是银河系之外的问题，天文学家展开了一场大论战。最终，随着更大威力的望远镜的出现和光谱技术的发展，通过细致地分析来自这些天体的光，天文学家认识到“星云”实际上有两大类：很多暗淡模糊的星云的确是银河系之外的星系；另一些星云则是银河系内的气体-尘埃云。下面，我们将了解星系是什么和它们怎么会是那样的。

各类星系

星系散布在宇宙各处，它们的形状、大小、质量各不相同。有些星系十分遥远，不用大的望远镜就很难看到它们，而另一些星系用小望远镜即可观测到，甚至是肉眼可见。最易于观测的星系就是我们的银河系，但我们是在银河系的内部观测它，有点“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。除了银河系，还有 3 个肉眼可见的星系：仙女星云、大麦哲伦云和小麦哲伦云。仙女星云（M31）呈旋涡形状，有几千亿颗恒星，离我们约 250 万光年，位于仙女星座。在远离城镇灯光污染的地方，肉眼就可以在黑暗夜空直接看到它。大麦哲伦云和小麦哲伦云实际

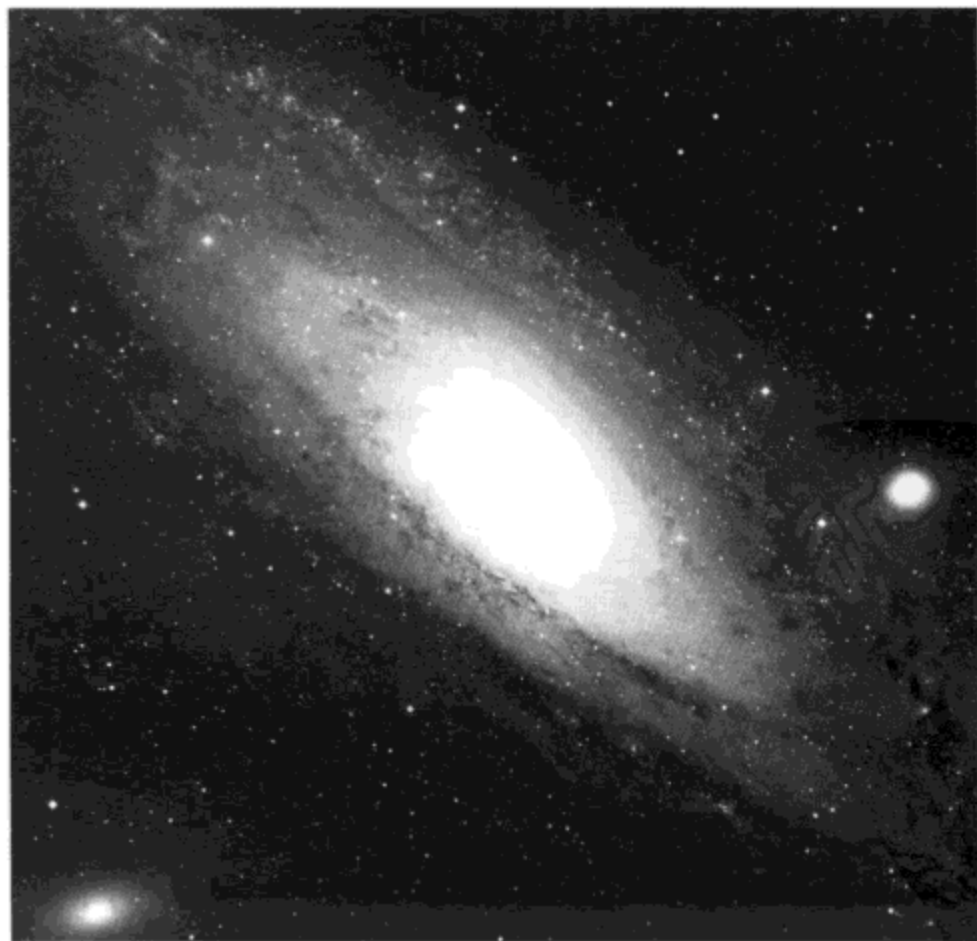


图 5.11 北半球的星空观测者可以用肉眼看到一个（银）河外星系，它就是仙女星云（M31），离“W”形的仙后星座不远。仙女星云离我们 250 万光年远，含有几千亿颗恒星

上是我们银河系的伴星系，它们的形状都不规则，位于南半球星空。

138 M31 是典型的旋涡星系，旋涡在自转，几亿年旋转一整圈。旋臂是我们特别感兴趣的，理由有几个。第一，我们的太阳系位于银河系的猎户旋臂的普通区域，离银河系中心（银心）约 $1/3$ （银河系半径），绕银心转动。第二，旋臂是恒星诞生的主要场所（位于猎户星云的恒星摇篮就是范例），你可以说我们在内视一个旋臂的生平。最后，由于我们知道旋涡有很多恒星形成区，因此我们对其进行研究就可以追溯年轻星系团（它们很多是旋涡星系）经历大规模“星暴”（译注：即在较短时间内大量形成恒星）的时间。

141 作为一种普遍规律，具有更延展的旋臂的星系必然有更多的气体和尘埃，因而恒星的形成也更加活跃。在宇宙早期，恒星大规模诞生，并且似乎是星系碰撞的结果。现在看起来，因互相碰撞而相互作用的星系数量很多，瓦解和合并的过程对旋涡的发育起着某些作用。

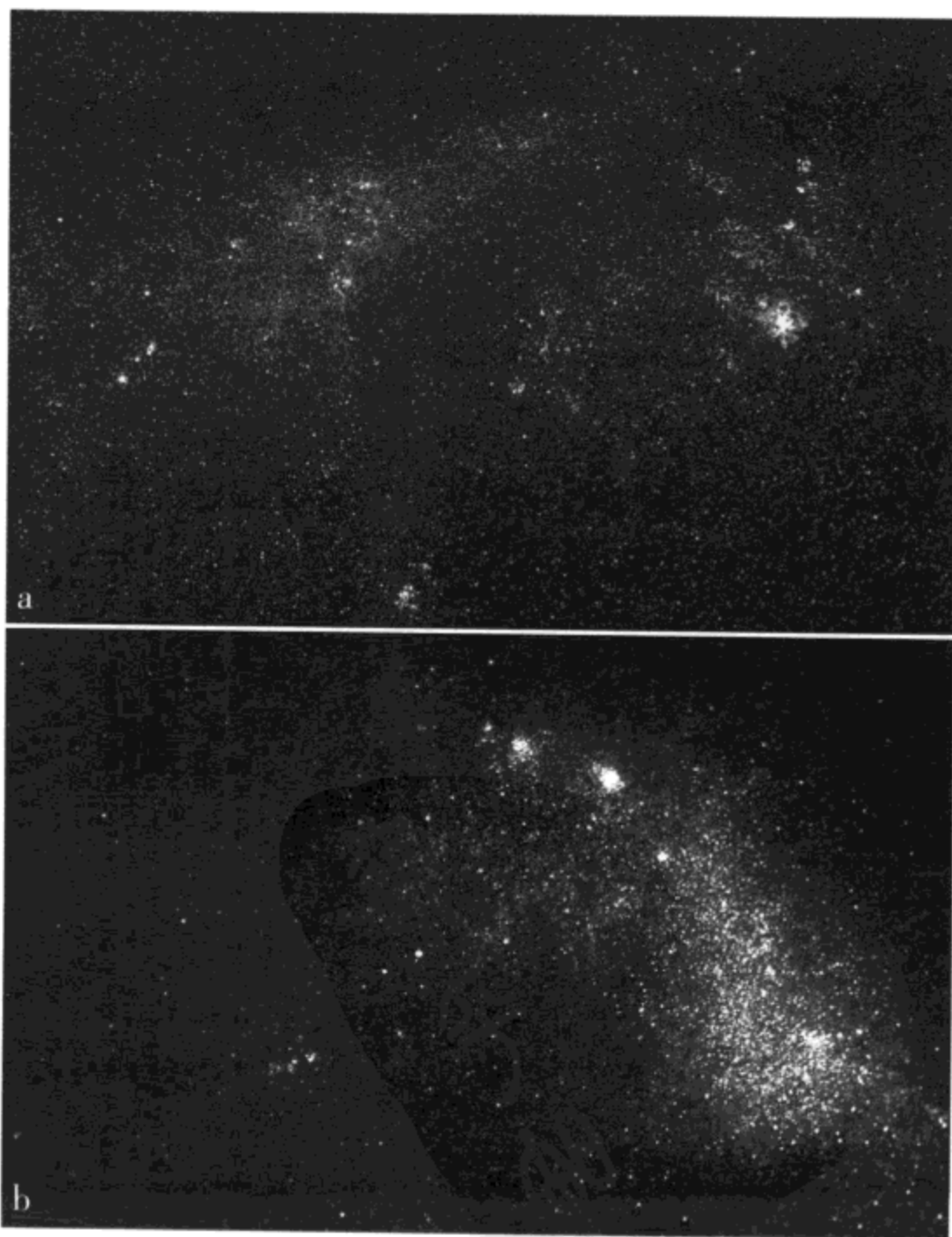


图 5.12 南半球星空的大麦哲伦云（图 a）和小麦哲伦云（图 b）分别位于剑鱼星座和杜鹃星座，是一对不规则星系。它们是银河系的伴星系，大、小麦哲伦云分别离我们约 17 万和 20 万光年



图 5.13 在南半球星空的天炉星座的 NGC 1365 是一个典型的棒旋星系

图 5.14 星系 M82 是一个不规则星系，看起来它在把自己撕开。这样的活动实际上是大规模的恒星诞生和恒星死亡的结果。淡蓝色的细带来自年轻热星的光。红色的丝状云是长度达 1 万光年的物质喷流，处于形成过程中的新恒星向外喷出的星风将中央区的物质吹向空间。这种超级星风可以让天文学家同时分析恒星的演化和它如何改变星系形状

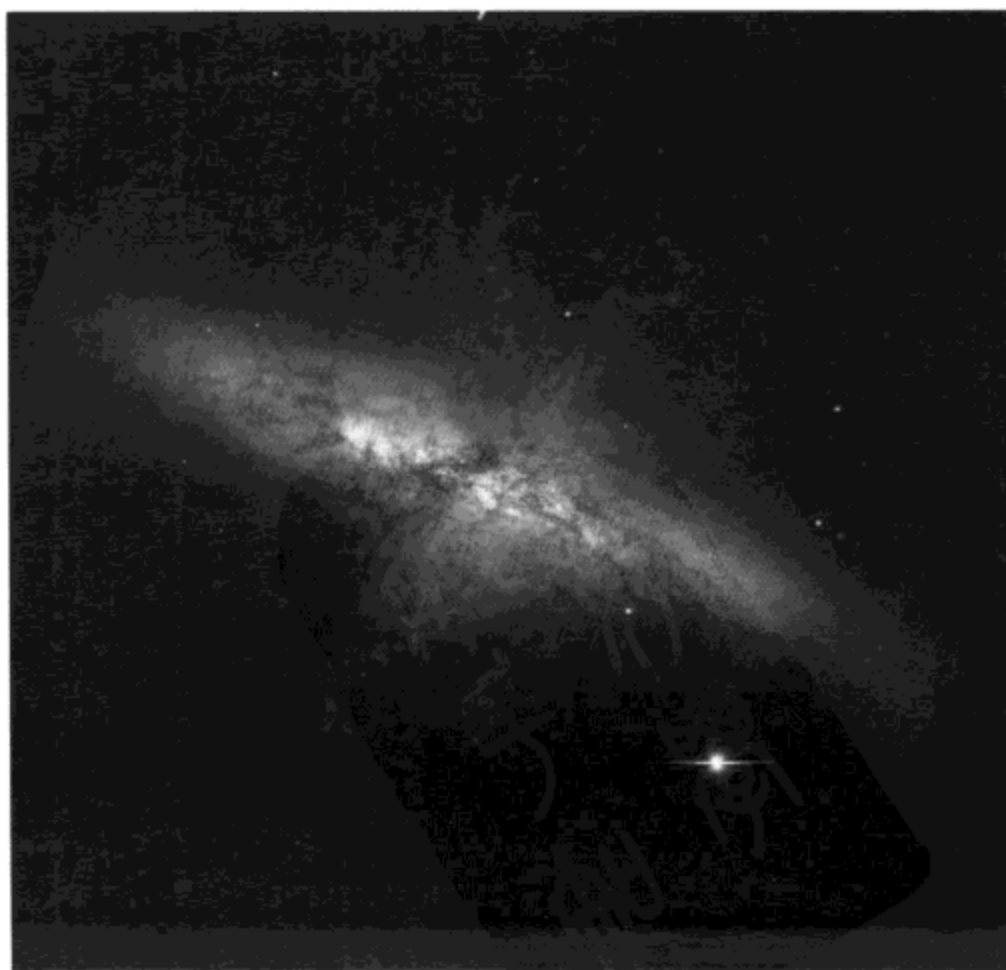


图 5.15 在星系 NGC 3079，一个发光的“大气锅”上正升腾着许多热气泡。右下方的图是该星系中央区的高分辨像，那里因恒星诞生形成的星风喷出 3500 光年长的气体风洞。此活动发生在百万年以前，而当剧烈的恒星诞生过程平息下来时，气体就降雨般地回落到星系，可能激发多“幕”的恒星形成

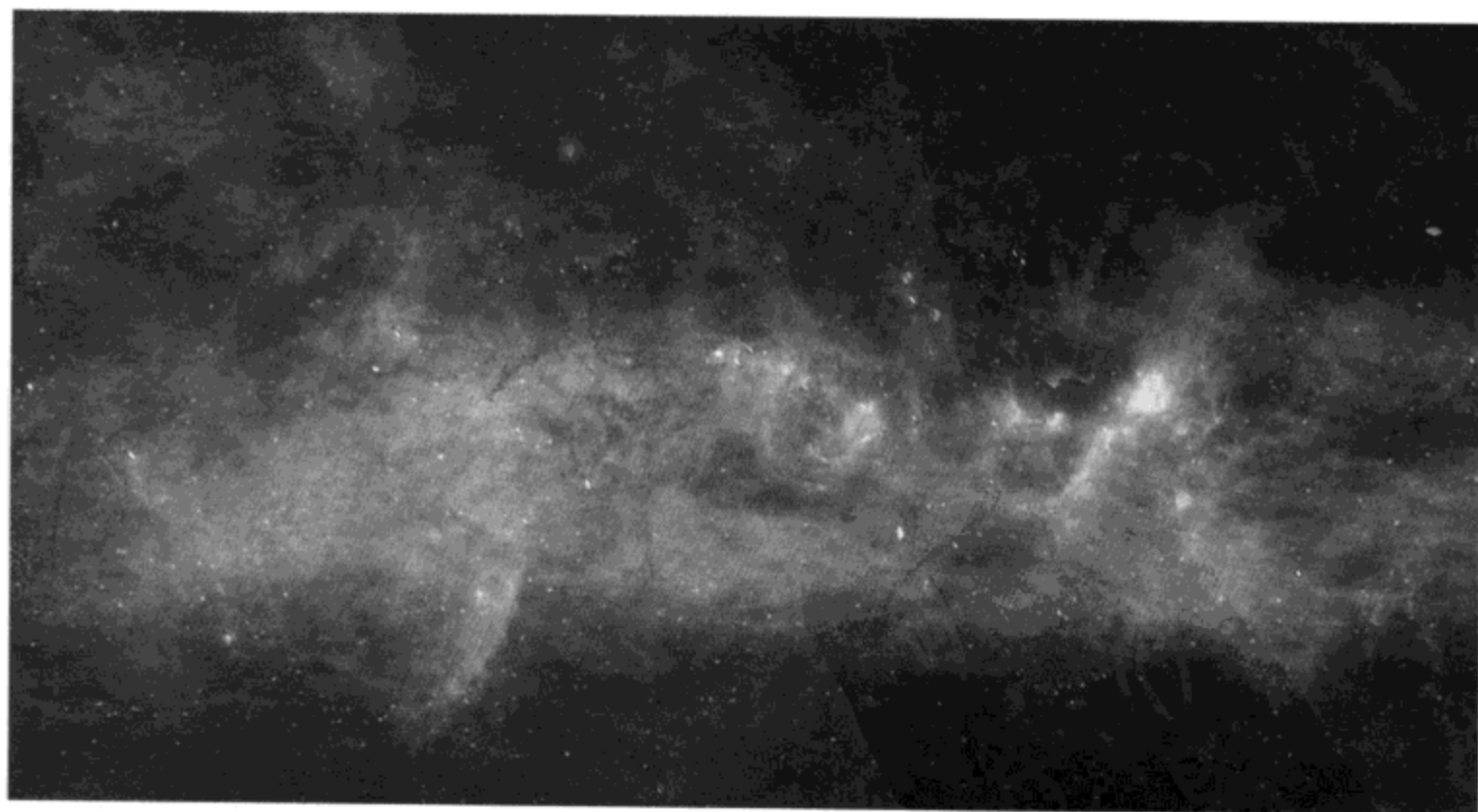
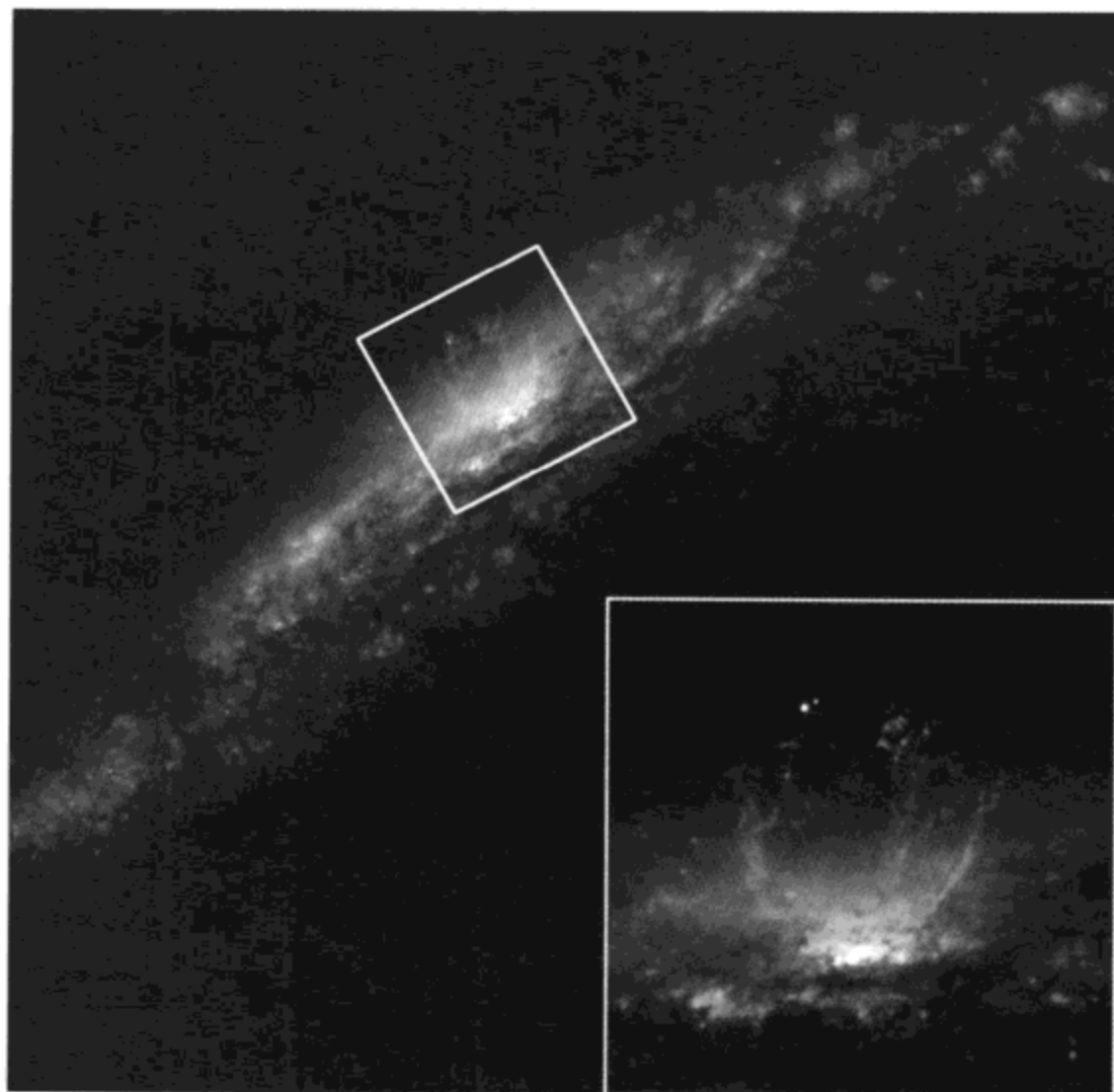


图 5.16 观测银河系的英仙旋臂可以揭示在银河系的星际物质中恒星形成和恒星死亡的大量证据。通过红外天文卫星 (IRAS) 探测和加拿大一个射电望远镜阵所进行的射电巡天探测，天文学家发现了该区几个云团 (图中的粉红色部分) 内氢气体的独特特征。该区域细微、不稳定的面貌可能是由于大质量热星的继续形成和激波的通过而造成的



图 5.17 NGC 1316 是天炉座星系团中的一个巨椭圆星系。从照片上可以看到很多暗的尘云和暗带，一些类似恒星的天体是属于该星系的球状星团

旋涡星系的中央核球呈现不同的大小和形状，有的非常巨大并近似球状，有的则很小而像一个点。棒旋星系是一种特殊情况，由恒星组成的棒穿过星系中央区，星系核一般有较老龄的恒星，虽然几乎总有星暴结排列在它们周围。

虽然最常见的是旋涡星系，而宇宙中最多的则是椭圆星系。椭圆星系通常是没有任何旋涡形状或旋涡结构的平滑扁圆形状，从近似于球状到近似于凸透镜形状都有。大多数椭圆星系内都有几百万或几十亿颗古老的恒星，产生下一代恒星所需的星际物质很少。

不属于旋涡星系或椭圆星系的星系都是不规则星系，它们约占所有已观测星系的 1/4。天文学家又把不规则星系分为两个亚类：有很多恒星形成活动的
不规则星系（即气体和尘埃云，但没有旋臂）和有某种扰动的不规则星系（可能因为与别的星系碰撞）。少数星系不在天文学家的这种一般性分类框架内，这些特别的星系有独特的结构或显示某种强烈活动，所以又被专门分类为致密星系、矮星系、特殊星系和活动星系核。

星系形状的多样性导致天文学家哈勃（Edwin Hubble）在 20 世纪 20 年代提出星系分类法，首先寻求星系演化的可能线索。他的想法是按扁率大小对椭圆星系进行细分：E0 是近乎球形的，E3 是较扁的，E7 是近似雪茄形（透镜形）的。同时，哈勃把旋涡星系分为两支：（正常）旋涡星系和棒旋星系，前一支按旋臂的开放程度和中央核球的大小分为 Sa、Sb、Sc，后一支类似地分为 SBa、SBb、SBc。不规则星系不在此分类方法内，而是另加细分。当哈勃作图表示他的星系分类时，自然地呈现“音叉”形。现在，这种音叉星系分类图已经扩充，包含了致密星系、矮星系、特殊星系、活动星系核。

星系的演化

借助于扩充的星系分类法，天文学家试图了解星系的形状是怎样形成的。人们正是在探求我们的银河系（被认为中心有一个黑洞的棒旋星系）的演化的过程中，对星系的形成产生了强烈的好奇心。由于恒星演化，因此人们肯定地推测星系也必然随着时间演变。但是，正如我们前面所说的，人的生命太短暂了，不可能看到历时几百万年或几十亿年之久的星系演变过程。

对恒星演化的研究方法也可以用来研究星系的演化。正如通过研究新生恒星星团来了解所诞生的不同类恒星一样，人们也可以通过研究星系团来了解星系的演化过程。

最好的方法是寻找不同距离的星系团，因为光线传播的时间不同，星系与我们的距离也不同，这就等于我们能够看到星系在更早时候的结构。观测者们观测的星系越来越多，并在此基础上形成了对星系演化过程的共识：第一，星系的自转引起密度波，类似于池塘中的水波，穿过恒星和星际物质；第二，某些星系因其自转而扁平化，它们的物质伸展得很宽而几乎类似盘状。在有活动区的星系中，超新星或星暴结的爆炸和星系核的活动驱动巨大气体云波动着穿过近星系的空间。近邻星系之间的引力相吸（仅仅相互越过）就会发生所谓的潮汐瓦解过程，扭曲和扰动它们的形貌。星系合并和碰撞灾难性地改变了它们的结构，并向

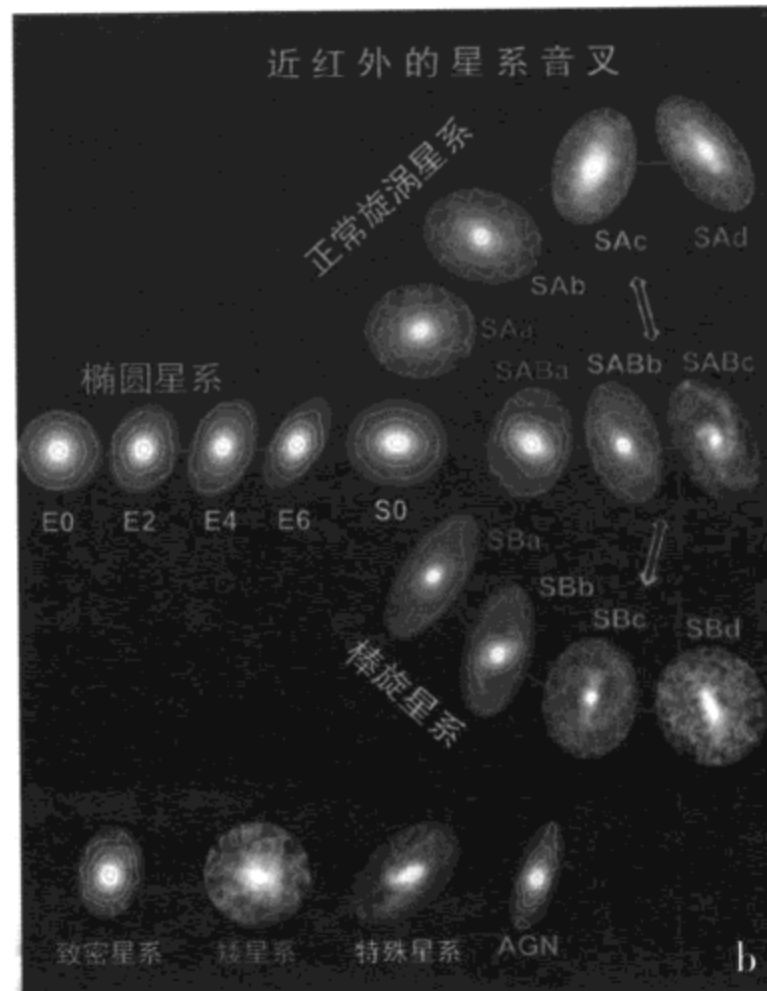
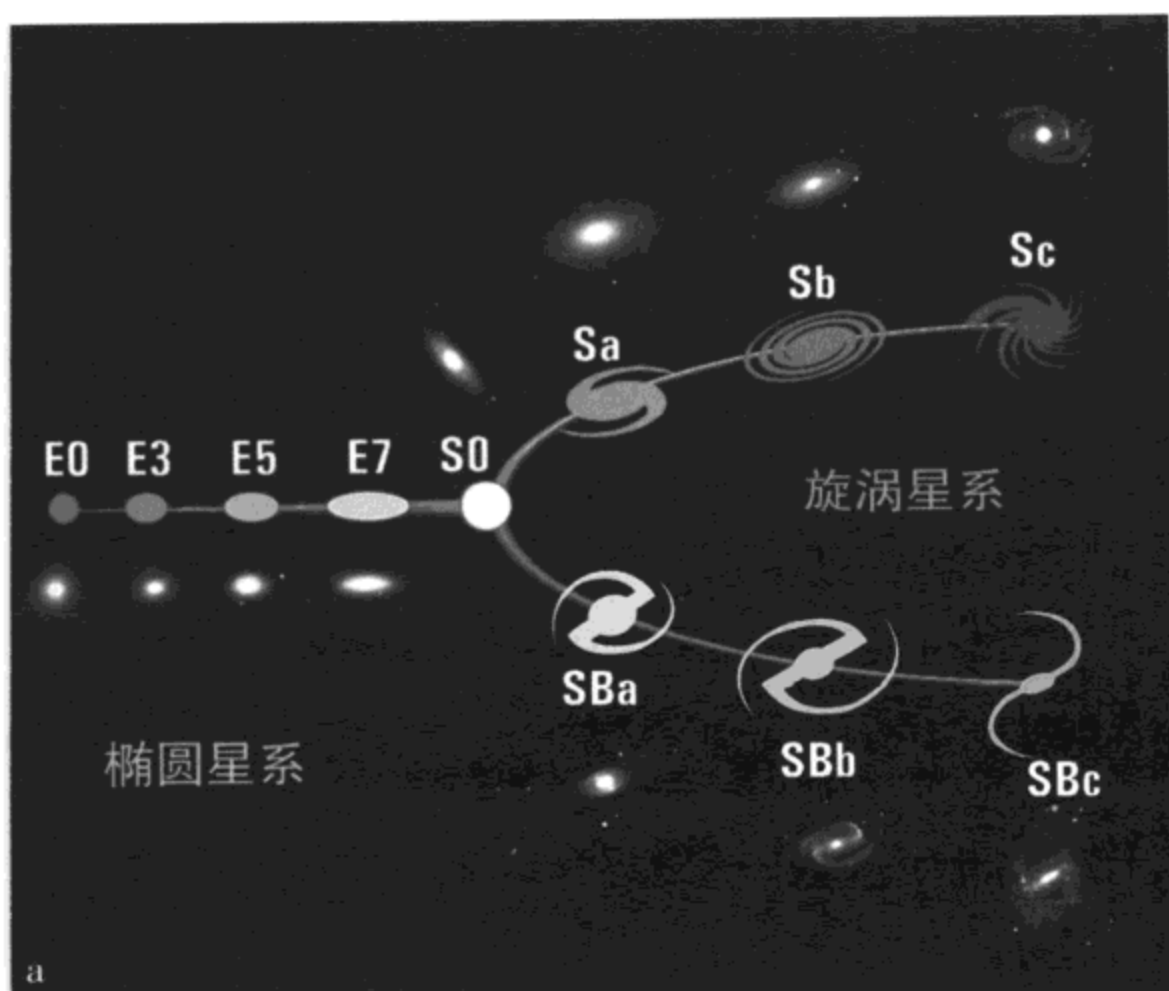


图 5.18 哈勃的音叉图提供了星系分类的直观方式 (图 a)。在图中, Sa、Sb、Sc 表示旋臂的打开程度由小到大的旋涡星系, 也分别代表早型星系、中型星系、晚型星系; SBa、SBb、SBc 还表示棒状物由小到大的棒旋星系; 椭圆星系按扁率由小到大的顺序, 用符号 E0~E7 表示, E0 是球状。S0 原来是假设的过渡型星系, 后来人们确实发现了 S0 星系, 符号“S0”上方的图像是一个此类星系的侧视。近年来, 人们根据红外星系巡天观测的成果, 对哈勃的音叉图做了修改, 使之更像一把叉子 (图 b)。椭圆星系仍从球形的 E0 星系开始, 一直到扁率最大的 E7 星系。旋涡星系按旋臂的打开程度 (由小到大) 和中央核球的大小 (跟星系大小比较, 由大到小) 分为 SAa、SAb、SAc 或 SAd。棒旋星系也按旋臂的打开程度 (由小到大) 和棒状物的大小 (由大到小) 分为 SBa、SBb、SBc 或 SBd。中间一支是对旋涡星系进一步细分所形成的亚类。不规则星系标记为致密星系、矮星系、特殊星系、活动星系核 (AGN)

恒星际和星系际空间放出能量和物质波。在大多情况下, 星系的碰撞和近距离相遇会导致星际物质运动, 最终导致气体-尘埃云密集而形成新的恒星。如我们在第 4 章所讨论的, 气体-尘埃云需要某种触发来启动恒星形成过程, 星系碰撞产生的激波正是这样一种触发。由于发生所有这些物质转移 (恒星诞生、自转和相互作用), 于是, 星系的形貌就改变了。现在, 天文学家已经能够拍摄到遥远星系的细节, 从而对星系演化有了更多的片段了解, 但天文学家还不能完全认识星系演化的整个过程。

探索深空星系

星系研究正在转移到所谓的深空观测, 以深入研究宇宙而寻找星系生平的最

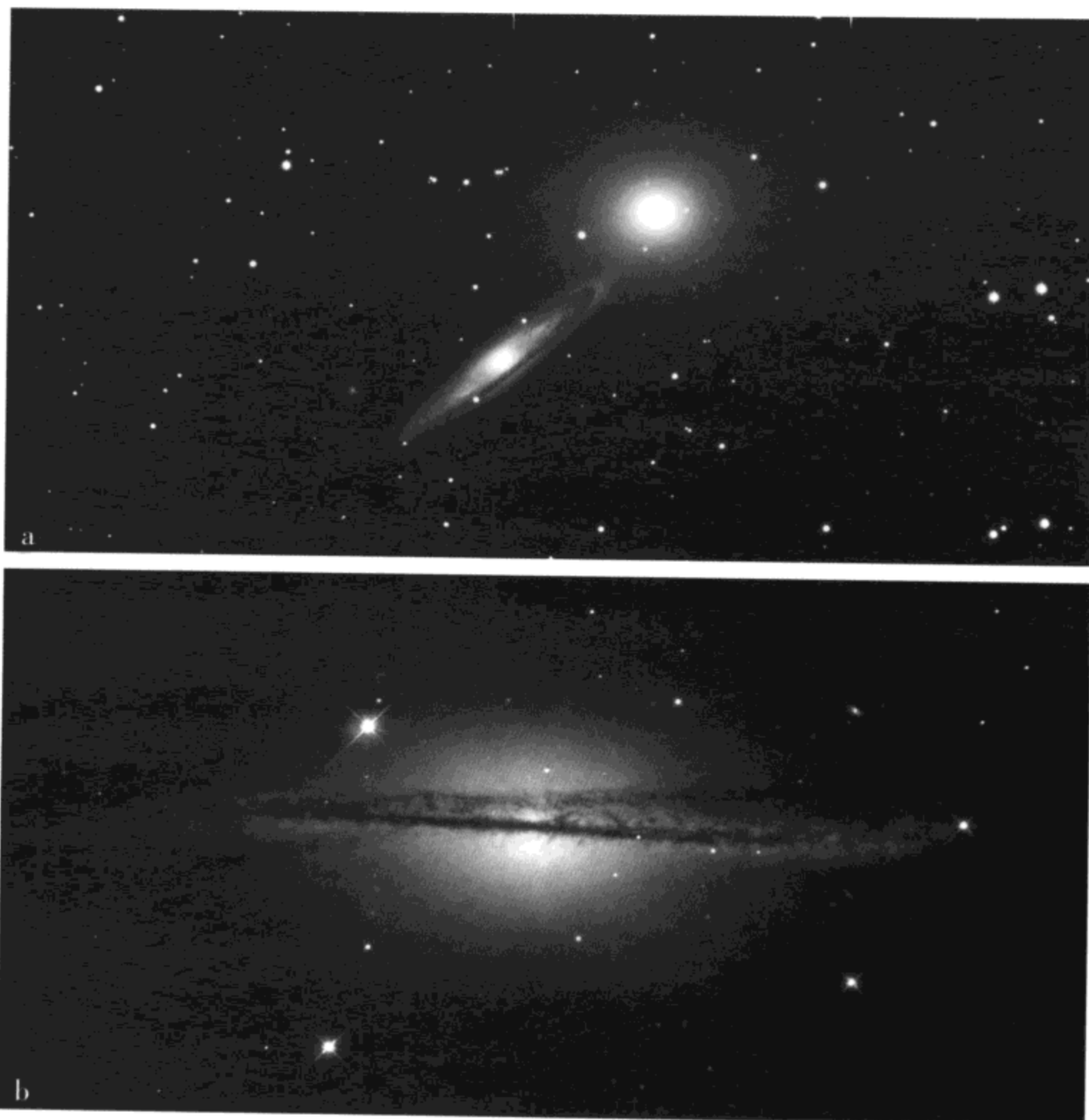


图 5.19 在图 a 中，一个椭圆星系和一个旋涡星系近距离相遇，从而引起形状的变化。NGC 5090（左下方的星系）好像从其外旋臂抛出物质给 NGC 5091（右上方的椭圆星系）。在图 b 中，星系 ESO 510-G13 的强烈扭曲盘是由于与另一个星系的碰撞而形成的，侵入星系在合并中被吞噬。引力扰动使两个星系变形，但最终扰动会平息下来。这时，两个星系成为一个看似正常的单星系。扭曲盘含有暗的尘埃和蓝星的亮云，这些恒星是由于星系物质的混合以及挤压和猛击使气体-尘埃云变密形成的

- 146 早的形式。哈勃空间望远镜对星系演化研究最重要的贡献就是所谓的哈勃深空观测计划，即在大熊星座的一小片天区巡查典型星系。选择这片天区是因为那里几乎没有近距离的恒星，而且望远镜可以连续地观测 10 天。这次星系巡查的视场（相当于你伸直手臂看向指尖所对应的那么小的天区）含有近 3000 个星系，这些星系非常暗，几乎到可以成像的极限。最暗星系的目视星等到 30 等，几乎比肉

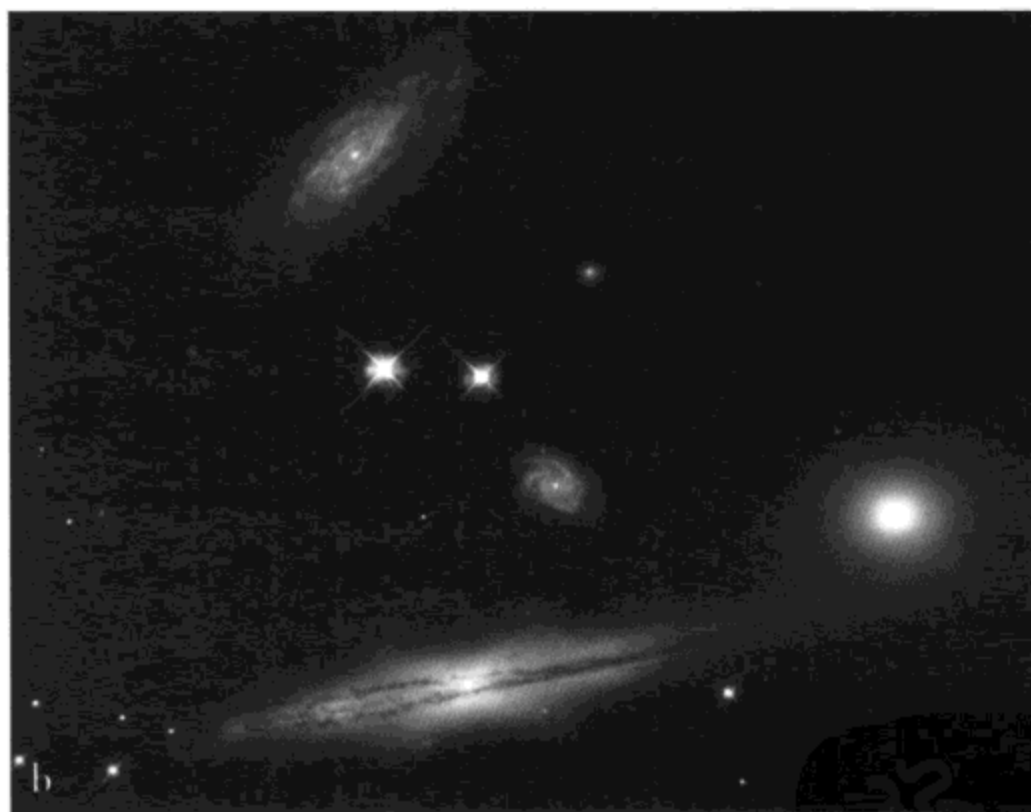


图 5.20 图 a: 棒旋星系 NGC 6872 有小的伴星系 IC 4970 (图 a 中心偏上) 相伴。这两个星系之间的相互作用从大星系 (棒旋星系 NGC 6872) 的星系核拉出气体-尘埃的长臂。NGC 6872 的上臂散布着恒星形成区。图中还有很多其他暗淡而更遥远的不同形态的星系。棒旋星系 NGC 6872 右下的亮星是银河系的前景星。图 b: 希克森致密群 87 (Hickson Compact Group 87, HCG 87) 包含 4 个星系, 由于这 4 个星系之间的相互引力约束, 它们仿佛在共跳“复杂舞蹈”。该群的最大星系 (HCG 87a) 实际上是盘状, 但很倾斜, 以至于我们几乎是从侧向观测它。HCG 87a 和它旁边的椭圆星系 (HCG 87b) 都有活动星系核。此群的第三个成员——近旁的旋涡星系 HCG 87c 可能在经历活跃的恒星形成暴。3 个星系之间的引力拖曳热气体流过它们, 从而加速了很多恒星诞生结的形成。这三个星系彼此是如此之近, 以至于引力破坏了它们的结构并改变了它们的演化过程



图 5.21 斯蒂芬五重星系是著名的相互作用成群星系，它们在约 2.7 亿光年以远，位于飞马星座。现在，天文学家正在通过哈勃空间望远镜对其中的 3 个星系进行研究。在这幅像上，至少有 2 个星系正在高速碰撞，并向空间驱出恒星和气体，但星系灾难也引发恒星形成暴，导致 100 多个星团和几个矮星系的形成

眼可见的暗 40 亿倍。第二次星系巡查选择了南天区，观测到了更多的年轻星系。天文学家估计，我们观测穿越 120 亿光年远的空间，就相当于将时间追溯到 120 亿光年前（相当于宇宙年龄的几分之一）。有关这些深空巡查的令人惊诧的事情是，假如我们能够以哈勃深空观测计划那样的观测效率巡查宇宙各个方向（且如果没有银河系阻挡我们的视线的话），我们就会看到空中到处都是星系。这些星系数以万亿计，几乎各个时期的都有，恒星形成暴活动频繁，恒星的核反应炉不断“加工”物质并将再循环释放到宇宙来产生下一代恒星。

哈勃空间望远镜在深空巡查的那些天体的距离和年龄令人难以想象，这向人们提出了一个问题：怎样知道它们有多远？测定这些天体的距离的一种方法是拍摄天体的光谱，分析光谱线的波长以确定其红移。由于宇宙在不断膨胀，远距离的天体在离我们远去，使光谱线完全地位移到光谱的红端。一个很遥远的天体会有很大的红移，于是，天文学家将一个天体红移的量称为 z 。通过进一步分析光谱，天文学家通常就能很好地估测天体的距离。



图 5.22 图 a 为地面望远镜拍摄的一对相互作用的星系 NGC 4038/4039 (简称天线星系)。这对星系距离我们 6300 万光年，位于南天乌鸦星座。它们相遇时的引潮力形成了两个亮物质的长尾，从碰撞处向外延伸，好像昆虫的触须（或天线）。图 b 为哈勃空间望远镜拍摄的这对星系已合并的部分。此孪生星系的分离双核是图中心左右两边的橘黄瓣，有暗尘的纤维交叉。一条宽的尘埃带在两个星系核之间延伸。扭曲的类旋涡纹上散布着亮的蓝色星团，这是碰撞引发恒星形成暴的结果

在估测哈勃深空观测计划中的星系的距离的基础上，天文学家开始估计在宇宙形成的最早期到底有多少恒星形成。寻找恒星诞生活动的最好线索是大质量热星，恰好它们的紫外光极其明亮。因此，假如天文学家拍摄遥远星系的不同颜色的像，并且在其中一张像上看到一个亮（光）信号红移，就可以大致推断该光信号来自于大量几乎同时诞生的大质量年轻热星。遥远星系的不同颜色的像能够帮助天文学家确定红移或 z 值（这就给出了星系的距离），同时也能让天文学家量度该星系中恒星形成的亮度。假如一个天体的红移很大，则有可能并不是所有的紫外光都能被我们的探测器观测到，而只是其中一部分。事实上，来自遥远星系的恒星的紫外光似乎因红移很大而“退出”某些波段的像——出现在别的波段的像上，临界点（具体位置）取决于该星系的 z 值（红移）。148

这些遥远星系往往看起来不像我们通常看见的正常星系。有时它们似乎是纤弱的，或有破碎形貌，仿佛仍在形成过程之中。这就使天文学家想知道这些星系

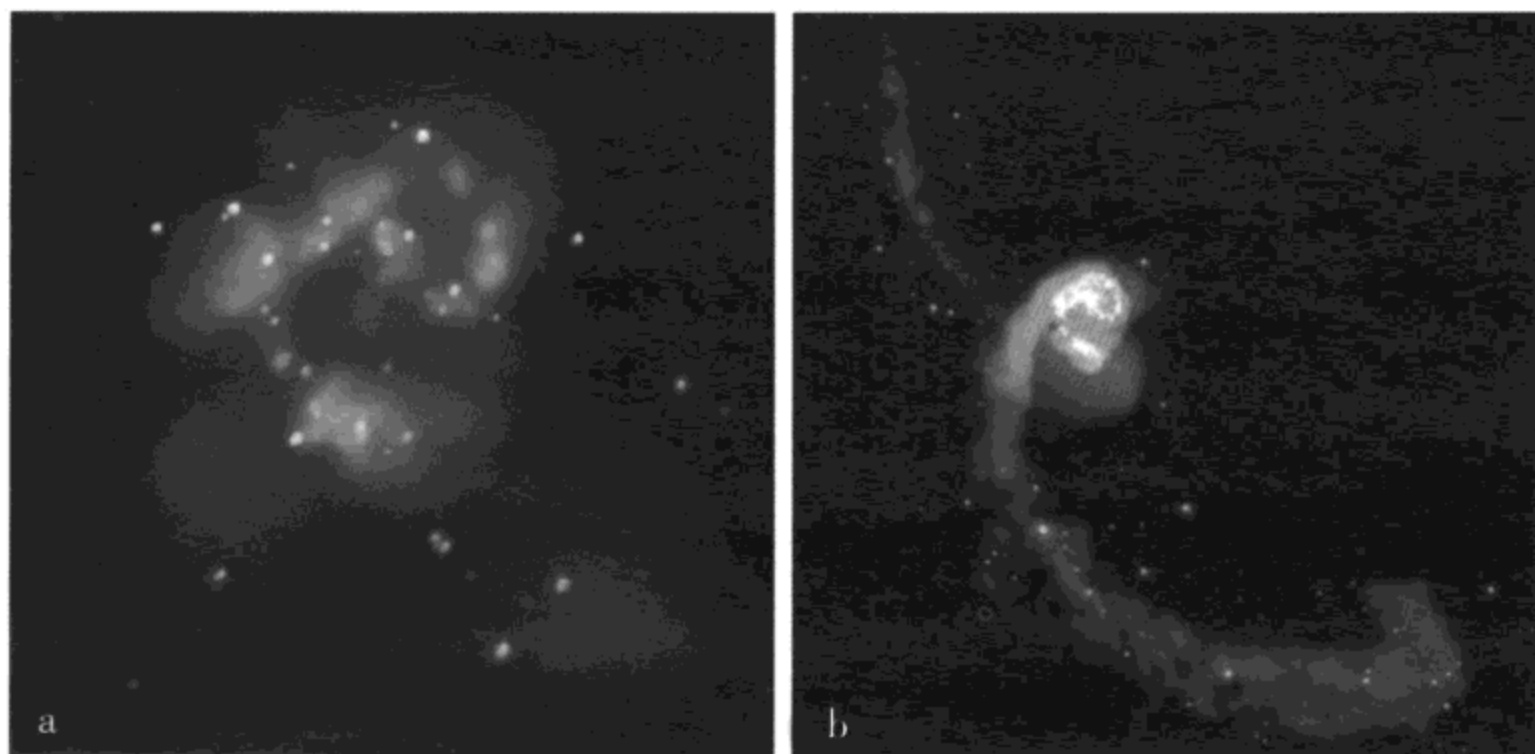
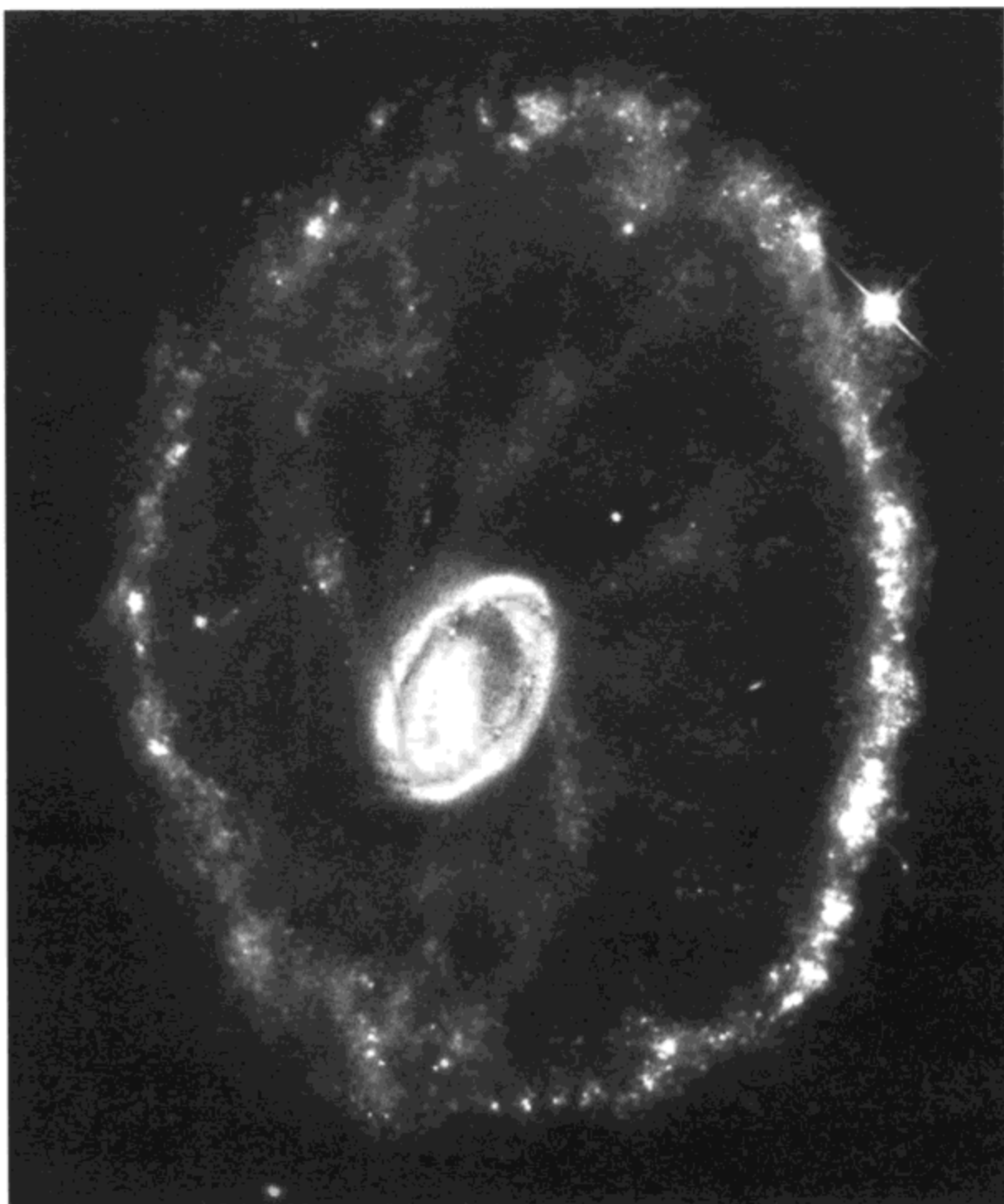


图 5.23 在 X 射线波段观测天线星系时，天文学家在与可见光像上（产生年轻的大质量蓝星的）的星暴区的相同区域内，发现了大量极亮的源。这些 X 射线源的发射功率比银河系的类似源强 10 倍到几百倍，这可能对向地球的大质量黑洞的高能喷流束。图 a 是一幅 X 射线像，显示了两个星系的中心区。几十个亮的点状源是中子星或黑洞，它们吸拽附近恒星的气体。图 b 是一幅伪彩像，绿色和白色表示光学波段的星光，蓝色表示氢气体的射电发射。射电观测绘出碰撞星系中气体的分布，帮助天文学家确定两个星系的运动

在早期的实际结构是否存在某种不同的东西。由于它们的紫外光产生了红移，使得天文学家认为它们实际上是正常星系，之所以形状奇特，是因为我们只观测到了它们最亮的部分——正在形成的恒星区域。在对存在恒星形成区的一些较近的星系进行探测的基础之上，天文学家现在将目光放在更遥远的、形状奇特的星系，以确定（那些发射的亮紫外光红移到光谱的可见光区的）新生恒星的“浓度”（富集程度）。

哈勃深空观测计划的研究成果使得天文学家能够更好地估计这些星系的距离、它们的恒星的形成率，并能得出这一恒星形成率与最近的恒星形成率相比较的某些一般结论。很多星系在 80 亿光年到 100 亿光年远，因此我们所看到的实际上是以前的恒星形成率，而那时的形成率比现在的约大 12 倍。现在我们面临的挑战是怎样利用这一结论去确定哪类星系正处于恒星形成高峰期，是旋涡星系吗？还是发生碰撞的星系？它们的恒星是在旋臂、长的“卷须”上形成，还是围绕星系核排列？这些问题的解决有待于进一步的光谱观测。

图 5.24 著名的车轮星系，巨大的环上有几十亿颗新生恒星。像考古学家在古代遗址上发掘一样，天文学家必须推算 5 亿年前发生在这里的事件的前因后果，并确定是附近的哪个星系穿透了车轮星系的核心。邻近的两个星系很可能都是闯入者，但有些天文学家认为这次宇宙“交通事故”的肇事者早已从现场逃逸。在这次破坏车轮星系旋涡结构的碰撞发生之后，哈勃空间望远镜分辨出尾随此次碰撞的一些恒星生成结。整个外环点缀着大质量年轻热星，这些恒星是由于碰撞产生的高能冲击波压缩气体-尘埃云而形成的。在另一些区域，碰撞产生的能量引爆超新星



虽然观测更远的空间以看到最早的（和最年轻的）星系让人激动，但最重要的是要弄清这些星系是怎样开始形成的。它们可能不是从一个（具有它们现在质量总和）的均衡整体开始形成，而可能是从亚星系块（sub-galactic clump）开始形成。随着时间推移，大质量的亚星系块合并而形成我们现今看到的星系。为了检验这种看法，天文学家用哈勃空间望远镜观测武仙星座的一片星空，他们所看到的情况支持这种“亚星系块合并说”。18 个亚星系块由于其内部的几十亿颗恒星所发出的紫外光而发光，而这些紫外光红移到可见光区域。通过地面的光谱观测，天文学家证实 10 个亚星系块的距离为 110 亿光年，每个亚星系块的大小为

图 5.25 天文学家用哈勃空间望远镜搜寻最远星系时，拍摄到这幅像。在这幅像上可以看到几百个从前未曾见过的星系。除了典型的旋涡星系和椭圆星系之外，还有令人迷惑的、多种形状的、彩色的星系散布在这个钥匙孔大小的视野内。其中某些星系可能形成于“宇宙大爆炸”后 10 亿年内

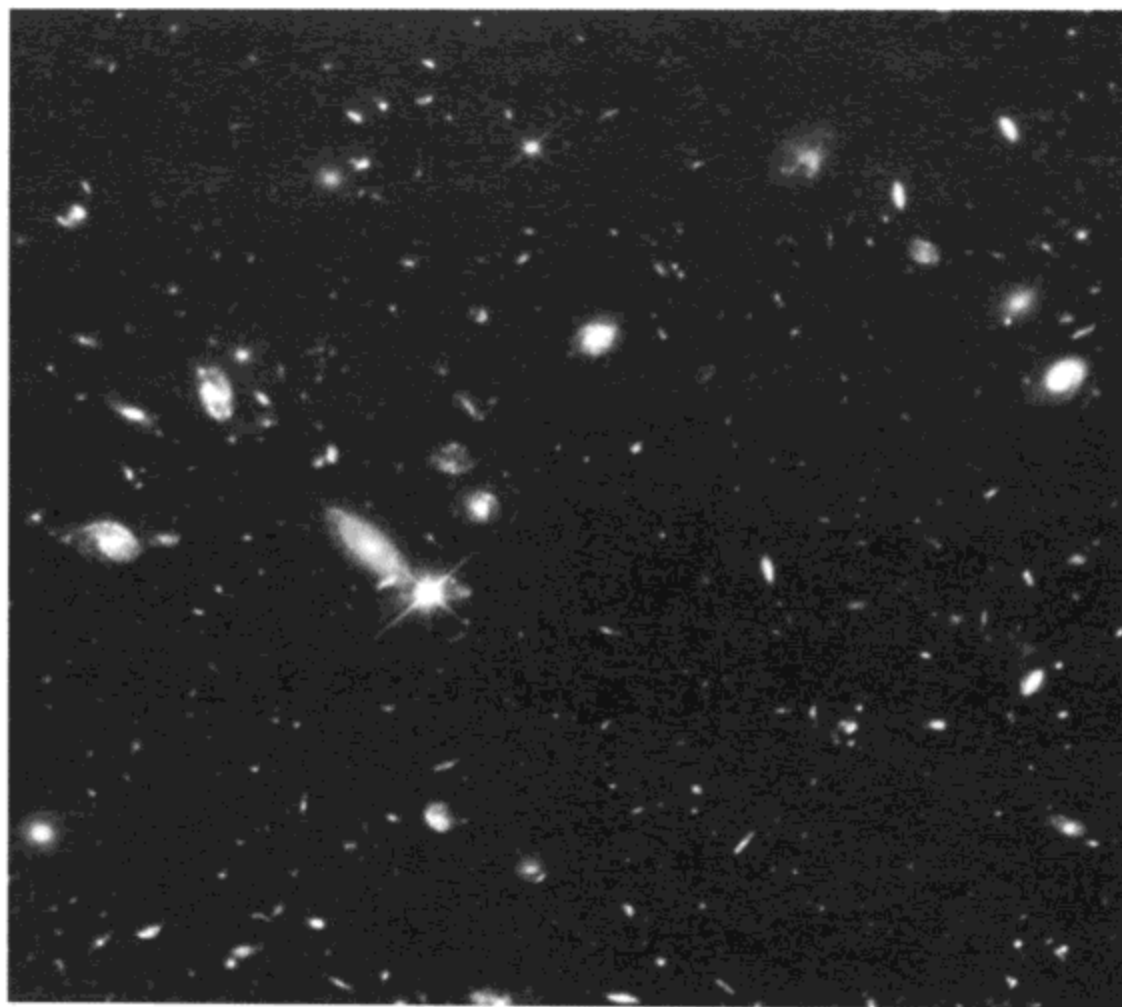


图 5.26 完成第一次哈勃深空观测计划的几年后，科学家把哈勃空间望远镜指南天极附近的杜鹃星座的一个小天区。如同哈勃深空观测计划所拍摄的北天空照片，这幅哈勃深空观测计划所拍摄的南天空照片上也有许多的不同星系，其中大部分是具有很多淡蓝色结的、酷似车轮的盘状星系，但也有特殊形状的、正在碰撞的星系。椭圆星系显得微红。照片上的彩色还显示了这些遥远星系中的不同族恒星，蓝色代表年轻的热星，红色可能是较古老的星（其星光被尘埃散射，或者是因宇宙膨胀使其星光红化）

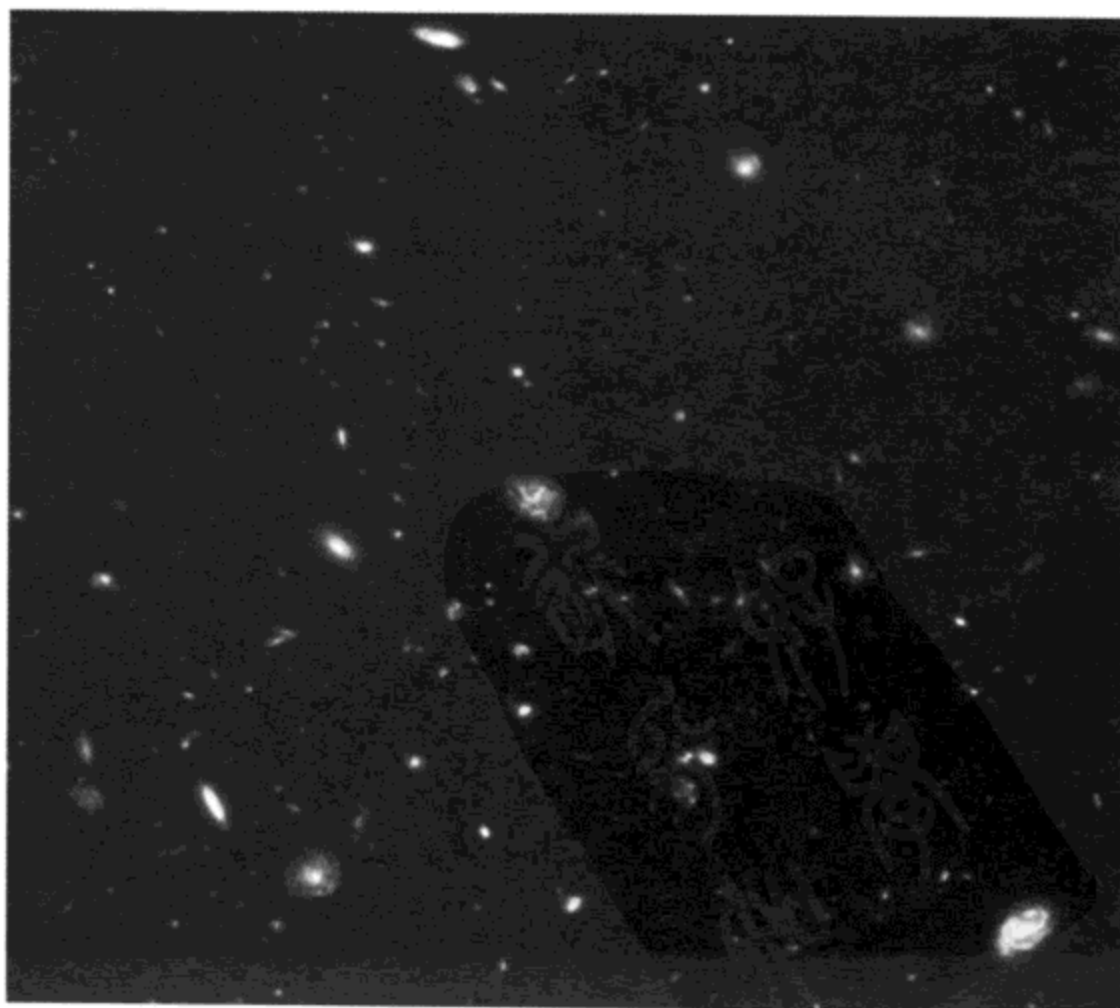


图 5.27 在紫外波段观测星系，你就可以发现过去的星暴活动的证据。天文学家研究了 NGC 3310 星系（它离我们 4600 万光年，位于大熊星座），以发现发出很强的紫外光的年轻超热恒星。在该星系中，年龄较大和年龄较小的恒星均匀地分布着，但是最亮的恒星（蓝色）主要分布在正在发展的旋臂上。在大多数星系中，恒星都是按照年代分离开来的，这使得识别那些距离较远星系的类型变得更加困难。此像的范例使天文学家可以寻找遥远宇宙中的类似星系（紫外光已红移）结构

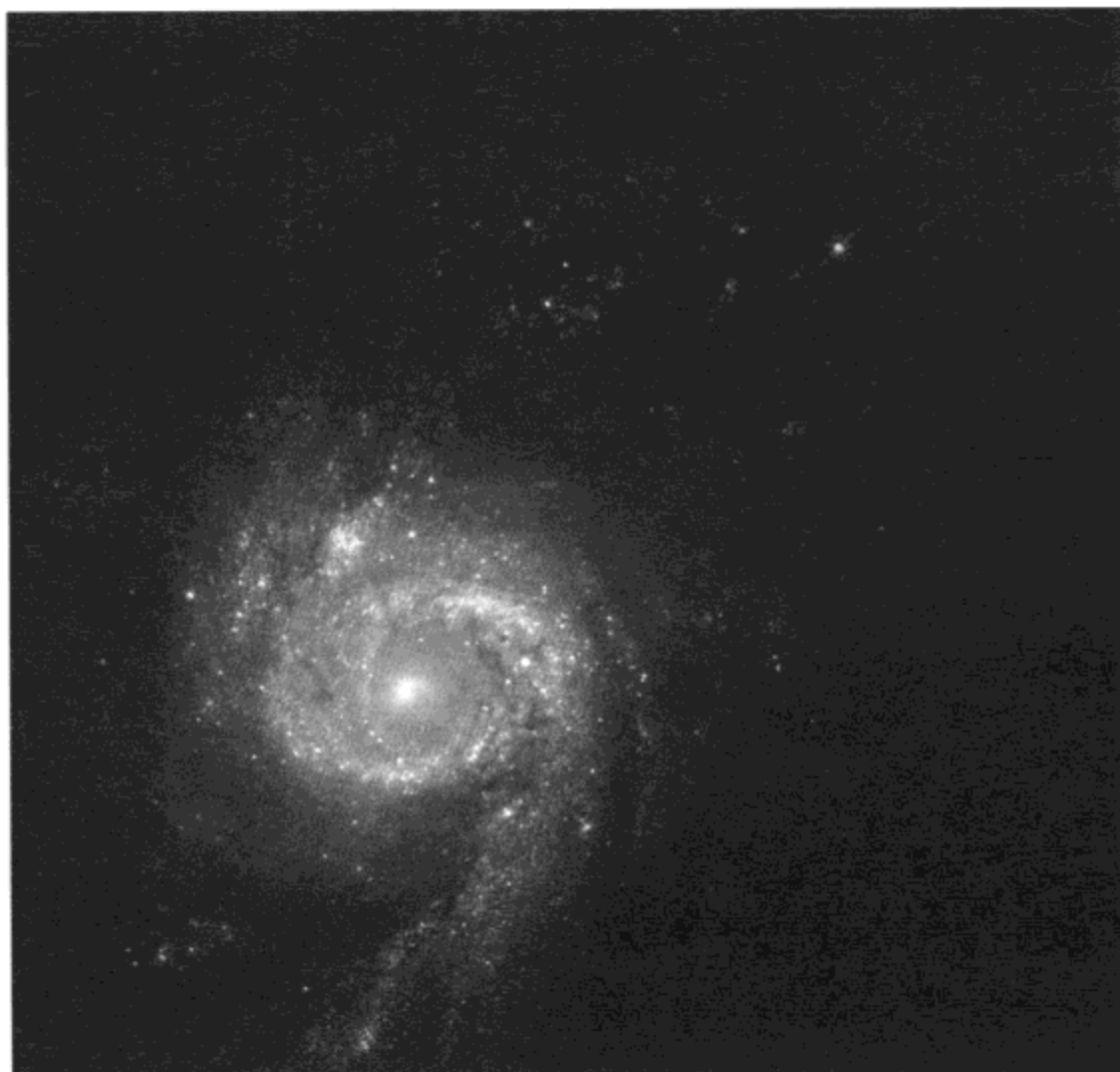
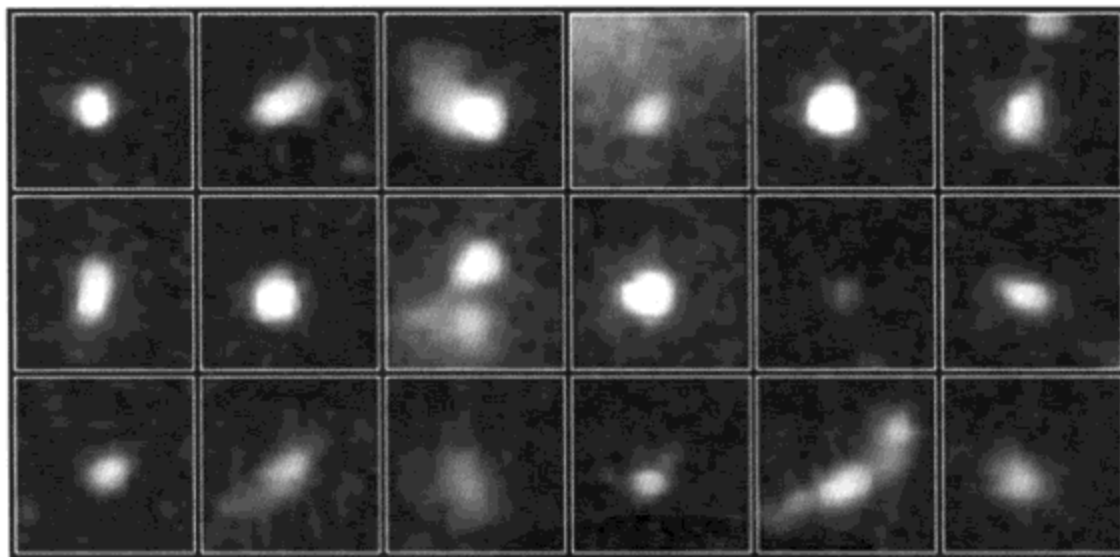


图 5.28 哈勃空间望远镜拍摄的 18 个可能的星系“建筑砖块”——亚星系块的真彩像，它们约在 110 亿光年远，光亮来自其内部几十亿颗恒星发出的紫外光。这些亚星系块可能正在合并，从而形成我们现今看到的、更为熟悉的星系



2000~3000 光年。下一步是探索星系形成的更早期和从亚星系块合并到现在所见的典型（大小和质量的）星系的原星系的演化途径。由于早期宇宙的密度远大于现在，碰撞可能更频繁地发生，这就把这些大质量亚星系块——构筑星系大厦的砖块——聚合在一起。

当我们观测星空的一个星系或观看书中的一幅照片时，很难相信星系核可以在宇宙中某些最剧烈的活动中扮演主角。在很长的一段时期里，人们认为星系是平静的。这样的看法在 1943 年改变了，天文学家赛弗特（Carl Seyfert）注意到少数星系具有反常特性（译注：具有这种特性的星系因而被称为“赛弗特星系”），它们在可见光下看起来像旋涡星系，但它们发射很强的射电信号，且在红外波段很亮。这些星系核的亮度在短时间内（通常小于 1 年）发生周期变化，这意味着活动源很小。通过对这些活动区域进行详细的光谱研究，天文学家发现从星系核向外有一种快速运动物质的喷流。

赛弗特星系是最活动的星系，天文学家现在认识到，很多星系的活动程度有很大的不同。过去我们曾认为银河系中心是较宁静的，而它实际上是射电信号的强发射源。活动程度最高的超光度类恒星天体——“类星体”，具有令人难以想象的明亮和高能。天文学家们仍在探索一种机制来解释此范围的星系“活力”。天文学家认为，黑洞或许是一种很好的候选者。

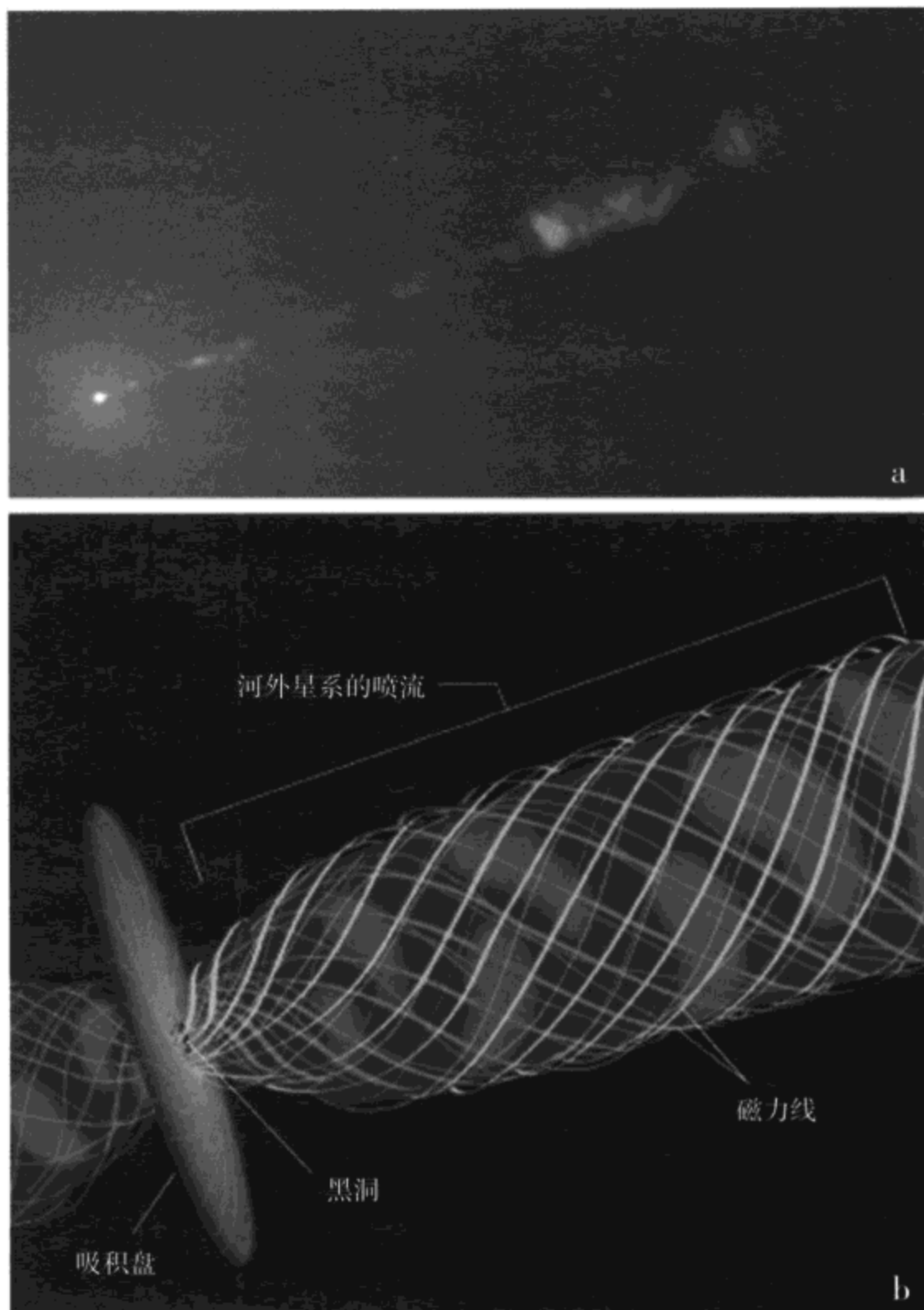
不久以前，黑洞还只是一种有趣的理论构想。当巨大数量的物质发生灾变性的自身坍缩，以至于它们聚集在具有极强引力的、密度很高的区域内，就形成“黑洞”。黑洞是一种奇异天体，其引力效应是如此之强，以至于它里面的任何东西（甚至光子）都逃不出来。

关于这种天体的密度如此之高以至于连光子也逃不出来的猜想，至少要追溯到两个世纪前。在人们的想象中，黑洞是奇异的地方，它不知怎么地就把科幻小说中的飞船送到另外一个世界。这是一个有趣的想法，但事实可能是进入黑洞的东西会受到极为强烈的挤压，以至于即使它穿越到某个别的地方，它也会成为一堆无从辨别的物质。

现在，天文学家和物理学家知道黑洞是存在的，而且更进一步，他们用黑洞来解释星系核的很多稀奇而令人惊诧的偶然事件。要了解黑洞为什么可以影响它的环境，应该先看一下它的结构。黑洞被称为视界（event horizon）的边界面包围。视界的半径为黑洞质量（太阳质量的倍数）乘以 3 千米。假如太阳坍缩为一个黑洞（实际上是不可能的），它的视界半径就是 3 千米，它的视界直径是半径的两倍——6 千米。假如太阳系中心有一个 2000 万倍于太阳质量的黑洞，其视界的半径大致相当于水星的公转轨道半径。

假如你在视界的外面，你未必会被吸进黑洞。但如果你在视界向黑洞迈出致

图 5.29 图 a 为圆星系 M87 (离我们约 5000 万光年), 有巨大的物质喷流从其星系核流出来, 在可见光、紫外、X 射线和射电波段都可以探测到。图 b 为一个黑洞示意图, 说明了与 M87 的喷流相类似的喷流是如何形成的。黑洞吸积盘 (红色) 的磁场紧密扭转而形成一通道, 使外喷高能粒子形成一个窄的喷流



命的一步, 你就会被拉进黑洞而无法逃离。我们可以将视界设想为终极防火墙, 它使我们 (和我们的探测器) 看不到黑洞内隐藏的任何东西。由于光子 (信息) 不能从黑洞逃出来, 所以我们无法知道视界内发生了什么。我们只能根据黑洞外 153 面发生的事情来进行推测。

黑洞有 3 种: 小 (或微型) 黑洞、恒星级黑洞、超大质量黑洞。小黑洞仍是理论上的推测, 一个也没有观测到。若是存在小黑洞的话, 它们可能是在宇宙大爆炸后不久的巨大压力、高温和湍动环境中形成, 其质量很小 (相当于地球上的

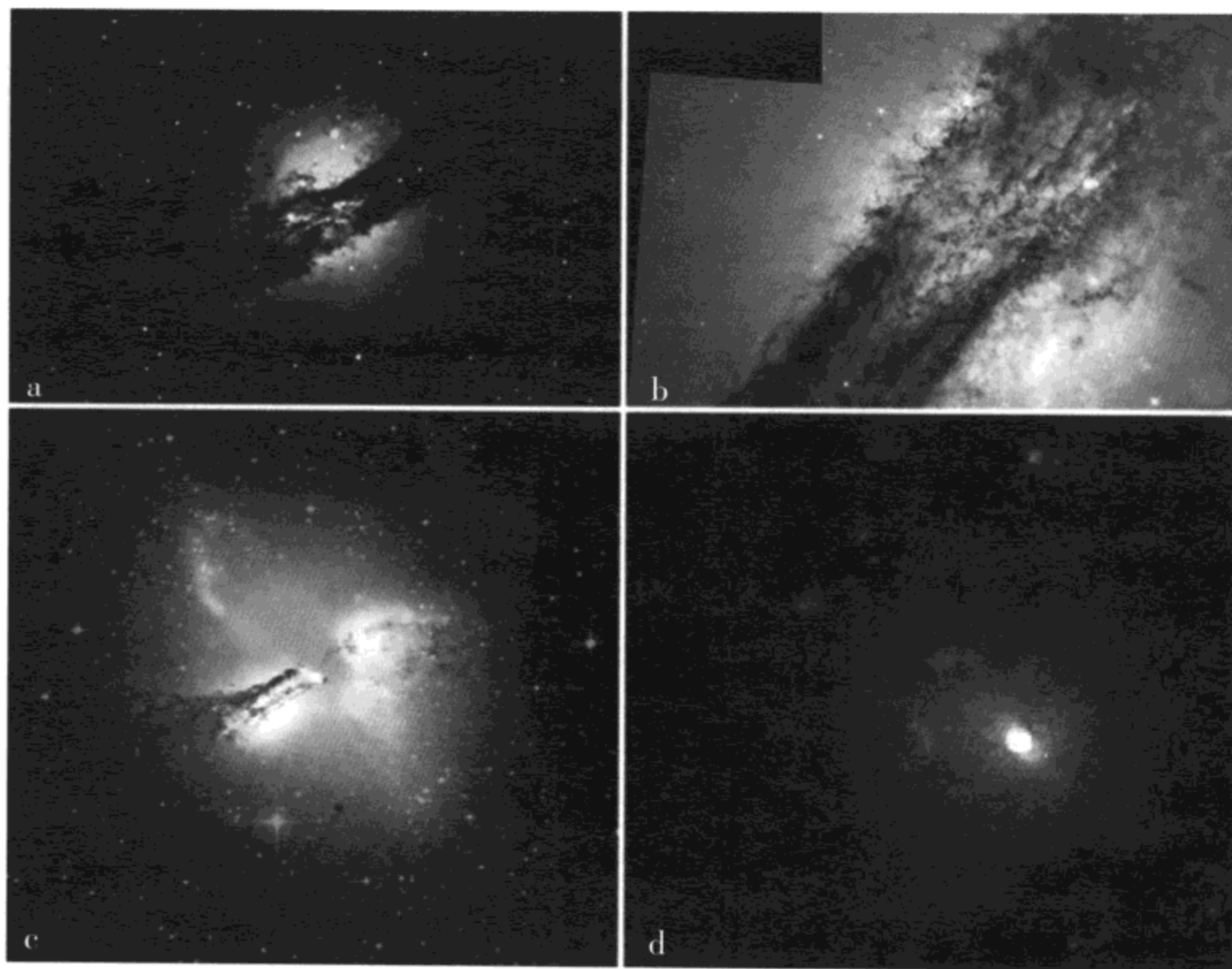
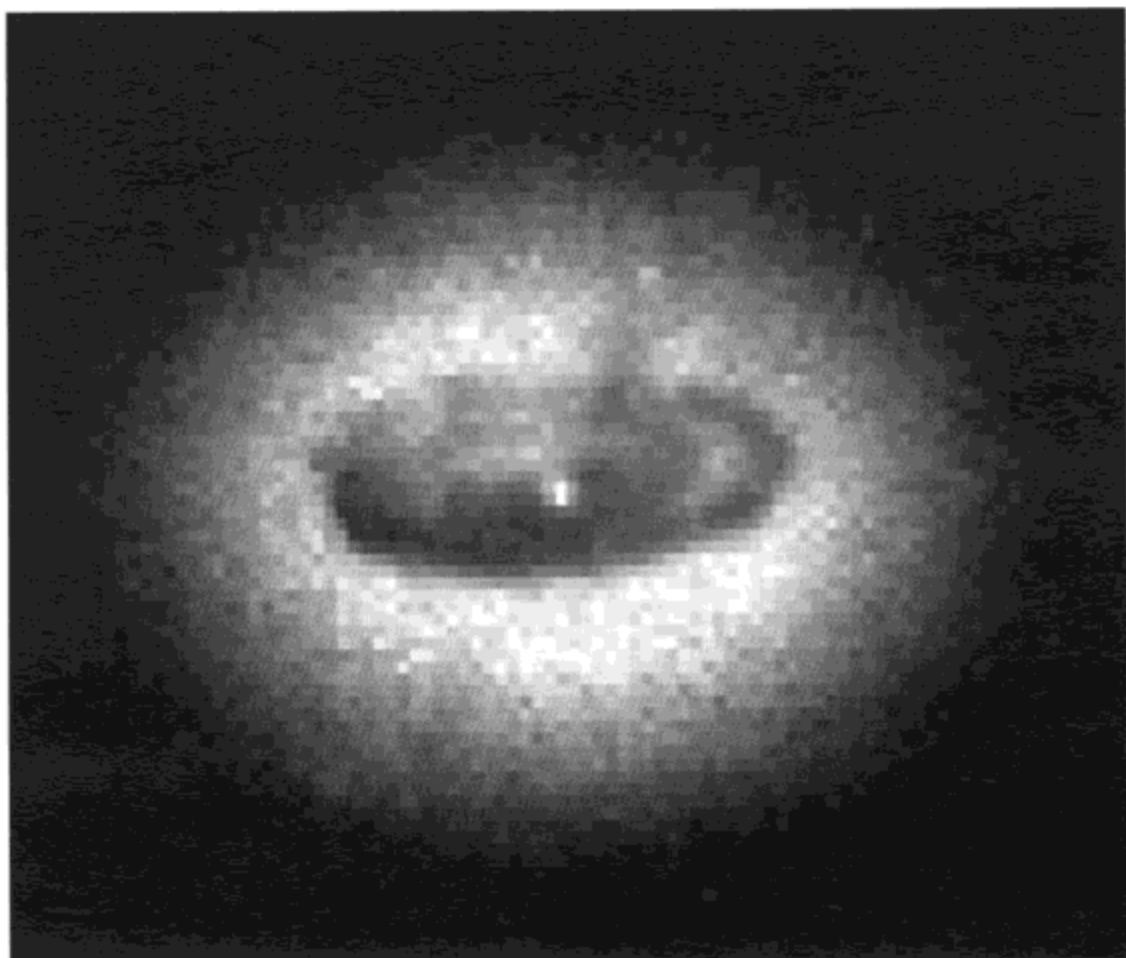


图 5.30 用地面光学望远镜和射电望远镜以及钱德拉 X 射线天文台、哈勃空间望远镜拍摄的半人马座 A 的多波段图像，显示一个星系正在把另一个星系湮灭到其中心区黑洞中。这一过程向外发送的能量波破坏了周围的气体-尘埃云，并使它们开始结合，在星系核附近形成数千颗新的恒星。图 a 为地面望远镜拍摄的光学像。图 b 为哈勃空间望远镜拍摄的宽场像，清楚地显示了尘埃带、恒星形成处和新生恒星星团。图 c 为钱德拉 X 射线天文台拍摄的像（蓝色）、地面光学望远镜拍摄的光学像（橙黄色）、地面射电连续辐射像（绿色）、地面射电 21 厘米辐射像（粉红色）的合成像，显示了该星系中心奇异活动的结果。几百万度的 X 射线发射气体在星系近旁形成两个弧。弧似乎是 25000 光年宽的激波波前，这可能是约 1000 万年前发生的“泰坦尼克”式爆炸的后果。图 d 为哈勃空间望远镜红外像，右下方显示在星系的暗尘带后面隐藏着一个因黑洞引力而扭曲的热气体盘

山脉的质量)，在几十亿年后就简单地在这次能量的闪亮（a flash of energy）中蒸发掉。超巨星的演化结局是成为恒星级黑洞。如果一颗恒星的星核的质量不小于 3 倍太阳质量，当它消耗掉内部的能源时，就会坍缩，产生超新星，抛掉其外层，留下的残存星核则成为黑洞。超大质量黑洞似乎是很多星系核的基本组成部分。对于形成大质量恒星级黑洞来说，拥挤着许多恒星的星系核则似乎是理想的条件。这些黑洞合并或聚集物质，从而形成越来越大的、几百万或几十亿倍太阳质量的超大质量黑洞，并且开始吞噬接近它的任何东西，包括恒星、气体、尘埃。

图 5.31 尽管喷流是超大质量黑洞最明显的特征，但天文学家在发现一个吸积盘以证明星系中心区存在黑洞方面却走了很长一段路。喷流和吸积盘是一个星系的中心区存在黑洞的证据。这幅哈勃空间望远镜拍摄的像展示了活动星系 NGC 4261 的中心区。这也是多尘盘的第一幅像。通过测量多尘盘的光，天文学家便可以根据多尘盘的自转速率（约每秒 420 千米）计算该黑洞的质量。图像中心的 V 形部分是从黑洞所在的多尘盘中心射出的一个强喷流



最终，在黑洞周围形成了一个巨大的吸积盘，供给物质到引力无底洞。这一过程并不是悄无声息地进行的，我们可以探测到这一过程的后果。有巨大能量从环绕黑洞的区域释放出来，所有被黑洞吸引的物质在接近视界时获得能量。在该物质流中，两物体之间的碰撞产生热和光，这些光大多设法逃了出来。由于吸积盘自转，盘内物质在黑洞的引力阱中搅扰，因而磁场增强。吸积盘的运动曳引磁力线而形成紧约束的旋涡。被黑洞吸引的降落物质受加热而产生带电粒子，它们沿磁力线飞出并被加速到接近光速，形成超热的等离子体喷流，延伸到星系之外。由于中央黑洞的质量在不断增大，因此喷流也不断增强，充实星系际空间。

这样一来，天文学家虽然不能直接探测到黑洞，但是可以寻找超热环境发射的射电波、强紫外线、X 射线和 γ 射线辐射，间接地发现黑洞。虽然天文学家在发现了黑洞所具有的很多环境效应时，他们一般会很高兴地声称发现了黑洞，但并不是每个高能辐射的发射体就一定是黑洞。

这样的环境证据是什么？NGC 5128（通常称为半人马座 A）是一个在其中央可能存在黑洞的星系。它的星系核发射很强的射电信号和 X 射线辐射，有超大质量喷流冲出几百万光年远。所有这些活动可能始于大约 1 亿年前一个小的旋涡

156

星系与半人马座 A 的合并。这次合并可能引发了恒星形成暴和我们看到的星系核剧烈活动。一个星系变得“活跃”时会辐射出巨大的能量，这可能对它的演化有重要影响。

类星体

下面我们简要地分析类星体，以结束对星系的讨论。这些亮的遥远天体原先作为强射电源而被探测到的，由于它们看似恒星，因此起先被称为“类星射电源”或“类星体”。它们似乎是极其活跃的星系，而由于这一原因，观测这些遥远的“怪物”有多强的辐射是很有用的。从观测上说，类星体是很亮的，但它们的亮度可能在相当短的时标上变化。令人惊奇的是，一个类星体的亮度或光度可能在一天或更短的时标上有起伏。这意味着它们是很小的。大的天体无法在横过其表面同步地（即全在同时）变化，某个天体的光度可以变化的最短时间是光线穿过整个天体的时间。因此，类星体必然是十分小的——或许不大于几“光天”（光在几天内传播的距离，或大致相当于太阳系的大小），以至于其亮度的变化才如我们所观测的那么快。

由于类星体是体积很小的天体，同时内部产生巨大能量、存在喷流，这些事实使天文学家推测：类星体的中央可能存在超大质量的黑洞。具有 100 亿倍太阳质量 ($10^{10}M_{\odot}$) 的超大质量黑洞，其视界的直径将达到 400 天文单位。假如像类星体那么亮的天体是每年吞进一个太阳质量那么多物质的黑洞，那么它就只有这么大。

假如这就是动力源，那么下一步就是准确确定是什么赋予类星体以动力。物质降落到黑洞，其能量怎样转换为我们所观测的类星体的从 X 射线到射电波的特殊辐射谱？回顾前面所述，我们由黑洞周围环境的引力效应推断大质量黑洞的存在，因此，假如我们有对黑洞质量和质量吸积率的独立估计，我们就可以跟观测的光度进行对比。

通过将新的类星体与已存在 100 亿年的类星体进行比较，我们可以发现较老的类星体的光度是较新的类星体的 100 倍左右。这意味着类星体像星系一样随时间而演化。若我们假定较大的质量吸积率造成较大的光度，那么，类星体中央黑洞的质量也必然随着时间而增加，而且过去的增加率较大。

- 157 基本了解类星体的辐射有助于解答有关类星体演化的诸问题。天文学家研究类星体的光谱，发现了很多宽的发射谱线。一种解释是环绕（类星体的）黑洞运动的气体云产生了这些谱线。假如这一解释正确的话，我们就可以根据气体云的速度来确定该黑洞的质量。

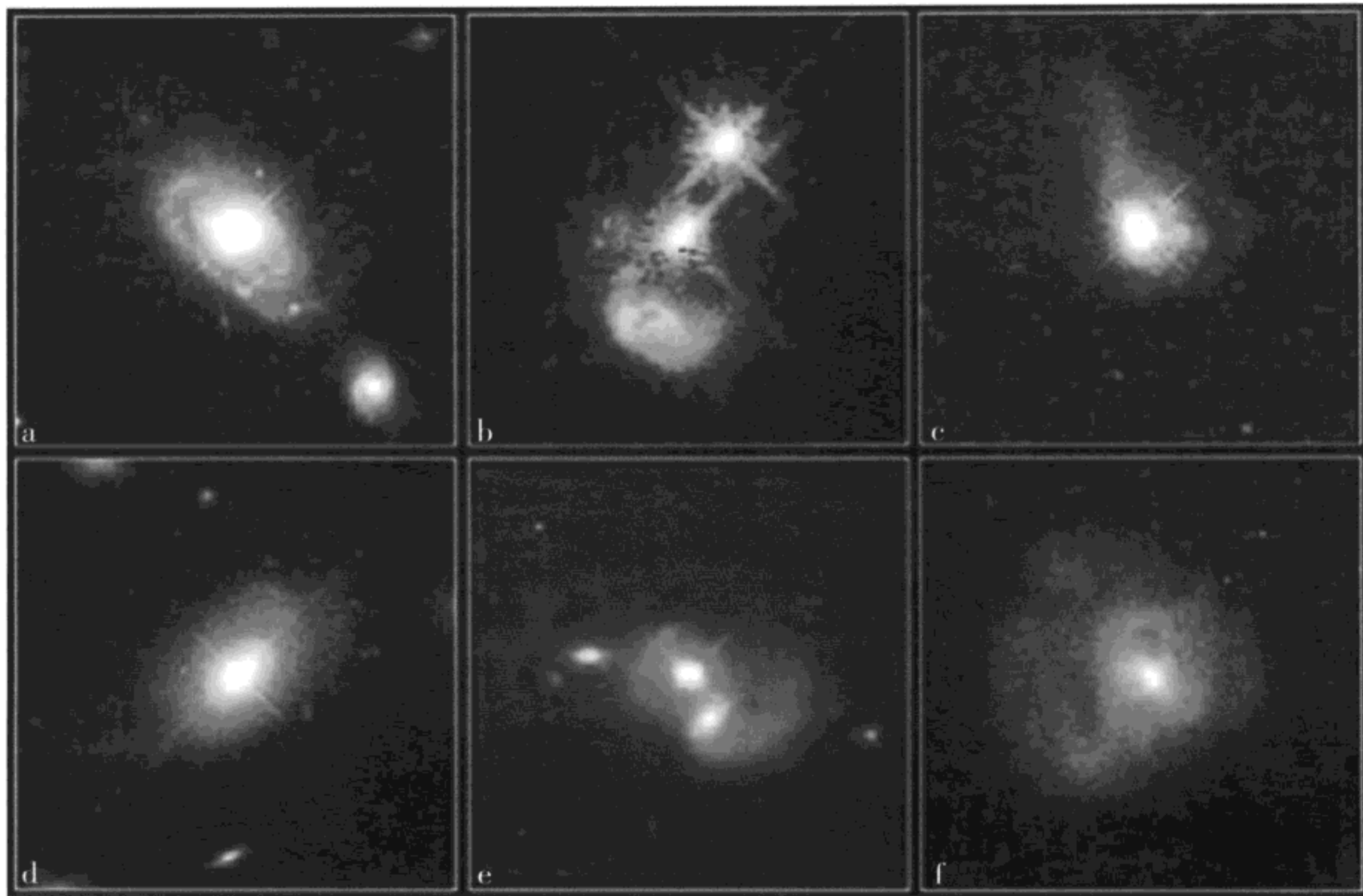


图 5.32 哈勃空间望远镜在所有恰当的星系位置发现类星体。图 a 为一个类星体与一个正常星系核争辉。图 b 为一个类星体（正中）与另一个星系（下方）发生灾难性碰撞，类星体上方的亮星是该方向上的近距离恒星。图 c 为一个类星体已捕获的尘埃-气体潮汐尾，这个尘埃-气体潮汐尾可能来自在附近经过的星系（没有在照片上）。图 d 为位于某正常旋涡星系的中心的一个类星体。图 e 为一个类星体与一个亮的星系的合并。图 f 为发亮的气体环，它可能是由于两个星系合并所形成的

在本章开始，我们讨论了星系之间的碰撞和它们恒星形成暴的跳跃式触发。同样，这些星系碰撞同时也可能引发一个类星体的形成。但是，很多图像显示类星体是正常的、非扰动的星系。似乎很多类星体特别像猫，它们的行为方式不可思议、随心所欲，而人们对它们行为的研究也进展缓慢。



宇宙过去和未来

上帝不仅玩骰子，他还把它们抛到你不能看到它们的角落。

——斯蒂芬·霍金 (Steven Hawking)

天空就在我们头顶，无限延展并点缀着繁星，而我们常常背贴大地地躺着，仰望星辰，议论着有关它们是被制造的还是仅仅是偶然出现的。

——马克·吐温 (Mark Twain,《哈克贝利·费恩历险记》)

事情不是它们过去那样。

——艾灵敦 (Mercer Ellington)

最后，我们讲讲宇宙学。宇宙学是一门深奥的学科，包含有关宇宙的各种事物——宇宙的起源、演化、结构和最终命运。在宇宙学中存在着很多哲学思想，人们在黑夜观察星辰时，就会在头脑中引发这样的思想。就像哈克贝利·费恩那样，我们仰望星辰而惊叹，想知道“它们是被制造的还是仅仅是偶然出现的”。我们会像一代又一代的天文学家那样，不断寻找最遥远或最异常的天体，或者大发奇想：如果我们的观测距离足够远的话，是否能看见宇宙的“边缘”？基于诸如此类的思索，人们可能会提出（和可能解答）关于宇宙的一些实际问题。天体离我们到底有多远？宇宙的起始点在哪？我们可以看到起始点吗？而假如我们能看到它，我们会得出什么？为了解答这些问题，我们还需要解答另一个问题：宇宙有多么老？这又涉及另一个问题：宇宙是否会继续变大，形成更多的恒星和星系？或者宇宙是否会偶然发生别的事情？

在历史上，每次我们找出一种扩展视野的方法，我们对宇宙的认识就会深入一步。直到相对较近的时期，人们还认为地球是宇宙的中心，别的天体（太阳、月球以及其他的行星、恒星）都在近的天球上绕地球转动。今天我们对宇宙的了解少了一些以自我为中心，而变得更加客观和全面。我们知道宇宙的结构看起来像什么，但我们不得不以从宇宙之内的视角来描述宇宙的运动和演化——很像一



图 6.1 同卡瑞奇 (Tongariki) 的莫艾 (Moai) ——这些复活节岛上的石雕人物似乎凝视着孤立在大洋中的美丽复活节岛，颇似宇宙学家寻求了解宇宙的性质和我们在宇宙中的地位一样

条溪流中的鱼努力去解释自己所处的环境。

宇宙学不是天文学的最形象化的分支学科——虽然它肯定地使用天文仪器获得美丽的图像和令人惊奇的资料。仍然不存在这样的一套特殊的天文图片，使我们可以指着它们说“宇宙学看起来就是这个样子”。想要了解宇宙的起源和演化，我们必须能够利用从对恒星和星系的研究中所学到的关于宇宙的知识，在脑海中想象在我们观测不到的地方到底发生了什么。宇宙学家是研究宇宙演化的天文学家，他们用直接和间接的方法研究宇宙中的变化，并且提出自己的术语来表述宇宙学的主要看法。近年来，他们在尝试解释宇宙的形成和继续演变的过程时，已建立一系列要研究的关键概念和要解答的问题。其中最重要的两个研究课题是：到宇宙中最遥远天体的距离是多少？在宇宙中存在多少物质？这两个问题的答案将会帮助天文学家了解宇宙的年龄和终极命运。虽然研究的最近进展（与对更遥远的天体进行更好的观测相结合）已使天文学家对这两个问题有了更准确的认识，但也出现了几个新的“谜团”，像我们在下面将要讨论的所谓“暗物质”和“暗能量”[译注：广义地说，宇宙的一切都是“物质”的，物质的概念应从大家熟悉的平常物质（重子物质）扩展到其他一切类型的物质。物质的基本性质是质量和能量；按照广义相对论的质量-能量关系，可以理解为质量和能量是统一的，只是在不同场合分别习惯地使用质量或能量来表达]，这使得天文学家的工作更有趣，也更有挑战性。

159

的确，我们的全部天文学工具帮助我们观测更遥远的星系和类星体，探索宇宙过去曾经发生的事件。通过进行诸如宇宙背景探测器（COBE，测绘在微波波段和红外波段的宇宙图）、气球微波探测实验（BOOMERanG）和微波各向异性探测器（WMAP）之类的实验（这些实验都绘制似乎来自宇宙最遥远区域的微波辐射的背景），我们已经捕捉到在宇宙中回荡的宇宙诞生的最后耳语。国际紫外探测器（IUE）能够观测到遥远星系“心脏”的剧烈活动，而钱德拉 X 射线天文台正在探测这些高能天体以描绘其结构。当初设计哈勃空间望远镜时，主要是想用它来完成研究恒星的和星系的大量任务，但科学家也使用它解答那些复杂而艰深的、关于宇宙学的距离和宇宙的年龄等问题。

宇宙学距离和哈勃常数

我们将从距离的测定来开始我们的宇宙学讨论。如果人站在竖在地球上的一架宇宙梯子的脚下，仰望很高、很远的梯顶横木。虽然无法知道梯子究竟有多高，但是我们确实有办法一步一步地攀登上去。这与我们以前以自我为中心的宇宙观有很大的差别。我们现在知道自己在广袤的宇宙中所处的地位，而且我们正在了解别的天体离我们有多远。简单的好奇心驱使我们去探究假如我们测量宇宙的物理极限，我们是否能够了解宇宙的起源和演化。

为了解开这个伟大的谜，天文学家已经做了一些听起来很难理解的工作，比如确定哈勃常数的准确值。这个天文学家们千方百计去测定的数值（宇宙学家记为 H_0 ）非常重要，有如宇宙的“圣杯”。如果天文学家能够测定这个数值和到遥远天体的准确距离，那么，他们就有一个好的依据去确定宇宙的年龄、起源和演化。

现今，我们可以用多种方法得到遥远天体的距离，既有直接的方法，也有间接的方法（即距离是由观测别的量而间接推算出来的）。对于离我们较近的恒星，常用的方法是结合“视差法”（一年中从地球上看到恒星位置的视位移）和更巧妙的技术（诸如移动星团的测量）来确定星团的距离。如果其他星系中的和球状星团中的恒星可以按赫-罗图（图 4.11）分类，那么，主序星本身就可以成为确定距离的一种工具。

1924 年，美国天文学家哈勃（Edwin Hubble）测定了肉眼可见的著名星系——仙女座星云的距离。哈勃利用了该星云中称为造父型变星（以代表星——仙王座第四最亮星——的中文名“造父一”而命名）的恒星。造父型变星具有很有趣又有用的特性：它们本征亮度（光度或绝对星等）变化周期为 1~50 天。20 世纪的另一位天文学家勒维特（Henrietta Leavitt）绘制了大麦哲伦云中大致同样

远的很多造父型变星的光变图，她注意到：越亮的似乎光变周期越长，越暗的似乎光变周期越短，从而发现了造父型变星的“周期-光度关系”。如果我们测量一颗造父型变星的光变周期（即亮度从最亮变到最暗、再变到最亮所经过的时间），我们就可以利用“周期-光度关系”得到它的光度。因为恒星的视亮度（视星等）是它到我们距离的函数，把它的光度（绝对星等）和视亮度进行比较就可以得出距离。[译注：如果不计星光传播路途中的星际物质消（减弱）光，则天体的本征亮度等于视亮度与距离平方之积，即 M （绝对星等） $=m$ （视星等） $+5-5\lg r$ （距离，以秒差距为单位，或 $r=10\times 10^{0.2m-0.2M}$ ）。]哈勃把这种方法用于仙女座星云中的造父型变星，估算出它离我们约 100 万光年，这比银河系的直径大得多，因此解决了仙女座星云是否在银河系内的长期的、激烈的争论，结论是：仙女座星云是银河系之外的星系。自此之后，这种测定天体的距离和大小的方法又得到了多次改进，现今天文学家认为仙女座星云离我们约 250 万光年。

用现今天文学的说法，如果任何天体的光度可以用于测定距离，那么，该天体就是一个“标准烛光”。可以这样想象：你站在一间大房间的一端，以另一端的墙壁为背景，观察几个光源，假如所有的光源都是 100 瓦的灯泡，而且它们都在同样的距离，那么它们看起来都同样亮；如果某些灯泡比另外一些灯泡近，那么近的灯泡看起来会比较亮。但不管距离如何，这些灯泡的本征亮度实际上同样是 100 瓦。天文学家搜寻的是有相同本征亮度的天体——“标准烛光”，实质上就类似于宇宙的“100 瓦灯泡”。某些“标准烛光”可能在几光年远而看起来很亮，而另一些“标准烛光”则可能在几百万秒差距远而看起来非常暗弱。

以标准烛光为“量天尺”，天文学家已经测量了大麦哲伦云、小麦哲伦云和仙女座星云及其伴星系 M32 的距离。现在，他们能够观测这些星系旁边的其他星系中的最亮恒星，从而推算其距离。整体一个星系的光度也可以当作一个标准烛光，甚至一颗特定型的、亮度可以跟整个星系争辉的超新星也可（作为“标准烛光”）用于测定距离。

测定距离的另一种复杂方法是分析来自星系的光，分析光谱中的红移所包含的信息。提示一下，任何天体的光谱都显示该天体的或者沿光传播路途上的元素的特征谱线。当一个天体远离我们而去时，这些谱线就移向光谱的红端（即红移），这种现象称为“多普勒效应”。一个星系远离我们的速度越大，其谱线的红移就越大。哈勃首先在星系的红移与它远离我们的速度及距离之间建立起联系，他发现一条表述这种联系的足够近似的定律——“哈勃定律”。对于大多数星系，我们得出：它们远离我们的速度等于哈勃常数（ H_0 ）与它们距离的乘积。从宇宙学的观点来看，要得出准确的距离，确定哈勃常数是关键。一旦我们得出 H_0 这个常

数，我们就可以用它和测量的星系红移一起，去准确地定出星系的距离。

162 我们在前面提到了宇宙的距离梯子概念。很容易想到，我们的空间位置在梯子底部，大多数遥远的星系在梯子顶端。我们这里描述的方法——标准烛光（造父型变星、超新星、星系的光度）——恰恰是能让我们观测宇宙极限的更复杂模型的基础。此外，天文学家还找到更复杂的一些测定遥远天体距离的方法，这需要一本专业书才能够讲清楚。下面仅简要介绍天文学家一步步攀登“天体测距方法梯子”的“流程”，或者换一种方式说，建立测定更远天体的方法的逐步“外推”过程，让读者了解这种工作的艰难复杂性和天文学家的智慧。

首先，天文学家将造父型变星的距离作为确定哈勃常数的广泛基础；然后，他们找寻近的、但已超出观测能力的星系团（室女座星系团、后发座星系团、天炉座星系团、狮子座 I 星系团）中的造父型变星；接着，用一些方法校验造父型变星计算的准确性，并标定其他的测定距离方法。先是 Tully-Fisher 关系——用星系的氢原子的 21 厘米谱线宽度与光度的关系来推算距离。行星状星云光度函数（PNLF）让天文学家可以观测某星系中最亮的行星状星云并标定它们的光度来推算距离。另一种方法是观测椭圆星系的亮度并测量其表面各处的亮度涨落（函数）（“面亮度函数法”——SBF 法）。位于赫-罗图上红巨星分支顶端的一些红巨星在红外波段极其明亮，因而也可以作为标准烛光来标定距离，这就是 TRGB 法。因为无法观测到很远的造父型变星，因此将这些红巨星，包括超新星（非常明亮，但不是在所有星系中都能观测到）作为标准烛光可以测量更远的天体的距离。我们的目标是超越近的星系团（近的星系团因局部引力可能造成速度误差），来了解非常遥远的、不受引力影响的“远场流”（far field flow）。于是，我们将得到准确而可靠的 H_0 值（按照哈勃定律，可由一个天体的远离速度除以它的距离得出 H_0 值）。现今最

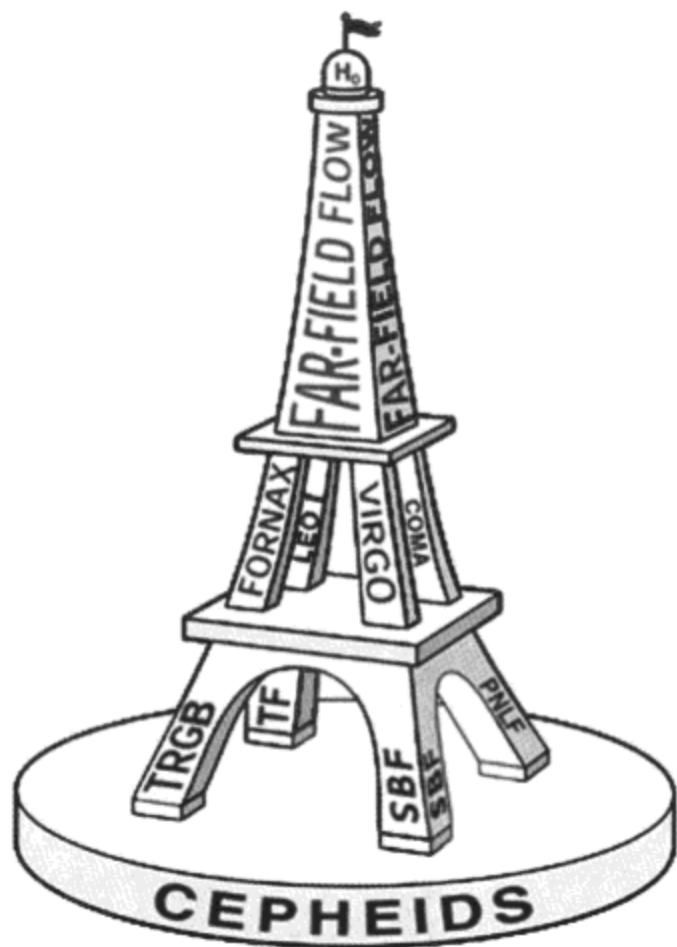


图 6.2 常用于测定遥远天体的距离的很多方法都画在这里了，它们好像构成可爱的“埃菲尔塔”。每种方法有助于得到哈勃常数 (H_0) 的可靠数值。图上的英文词或缩写词组含义如下：Cepheids——造父型变星；TRGB——红巨星分支顶；SBF——面亮度函数；PNLF——行星状星云光度函数；TF——Tully-Fisher 关系；Fornax, Leo I, Coma, Virgo——依次为天炉座、狮子座 I、后发座、室女座的星系团；FAR FIELD FLOW——远场流

佳估计的 H_0 值约为 70 千米/(秒·百万秒差距)[每百万秒差距每秒(钟)70 千米]。

这样,一旦我们得到宇宙学常数这个“圣杯”,我们就可以代入某些值,算出最老的星系有多远,然后求出宇宙的年龄。这是对的吗?很不幸,不对。哈勃常数只是帮助建立宇宙演化理论结构(以前被称为“标准模型”)的所需因素之一,我们可以把这种“标准模型”想象成宇宙学的蓝图。宇宙学家是绘画师,精心修正蓝图上的数字,以绘制新模型。他们必须处理的一些关键数字有:可以告诉我们宇宙何时开始的数字,描述宇宙膨胀的数字——其本身受宇宙中物质数量的影响。

膨胀的宇宙和物质为主的旧标准模型

在 20 世纪早期,天文学家发展了一些技术方法来估计遥远恒星和星系的距离。哈勃做了基础性的工作:发现星系的光谱线普遍地显示红移。他推断,如果把红移解释为多普勒位移(来自天体的光因其运动而导致波长变化),就意味着星系都在做远离我们的运动。而且,如果观测最远的一些星系,把它们的距离与它们的红移进行比较,就可以发现它们远离我们的速度最快。换句话说,星系越远,红移越大,因而远离速度越快。 163

基于这些观测,人们建立了“膨胀的宇宙”的观念。然而,即使所有的星系都在远离我们,也不意味着地球或太阳处于宇宙的中心,记住这一点是很重要的。为了理解这个“明显似非而是”的说法,我们不妨将膨胀的宇宙设想成一个气球,在气球上画很多代表星系的点,如果我们把气球吹大,它的表面就会膨胀而所有的点都会相互远离,不存在任何中心点;而且,每个点“看到”其他每个点都在远离,且最远的点远离的速度最大。广泛接受的观点是:宇宙不存在任何中心或特殊的位置,特别是地球或太阳或别的天体在任何方面都不特殊。

与膨胀的宇宙这一概念和测定距离的一些可靠方法一起,我们面对宇宙学的另一个大问题:宇宙有多老?这是在酒会或在因特网新闻讨论组上辩论的一个很热门的问题。当然,宇宙学家实际上并不会提出这样的问题,他们更愿意考虑他们能够解决的问题,比如影响宇宙膨胀速率的宇宙密度。这样,他们提出了专业性的宇宙学问题:宇宙的膨胀是在多久以前开始的?在宇宙各处的膨胀速率是相同的吗?宇宙密度如何影响它的膨胀速率?宇宙的临界密度是多大?若宇宙永远膨胀下去,它必须有多大密度?如果我们想要宇宙膨胀永远停下来,需要宇宙有多大的密度?对于宇宙学家来说,这些都是实际的大问题。

答案是复杂的,而做出方案则比较简单,宇宙学家为这些问题中的关键概念制定了数值和符号。我们已经谈过 H_0 ,它表示宇宙的现在膨胀速率,并以千

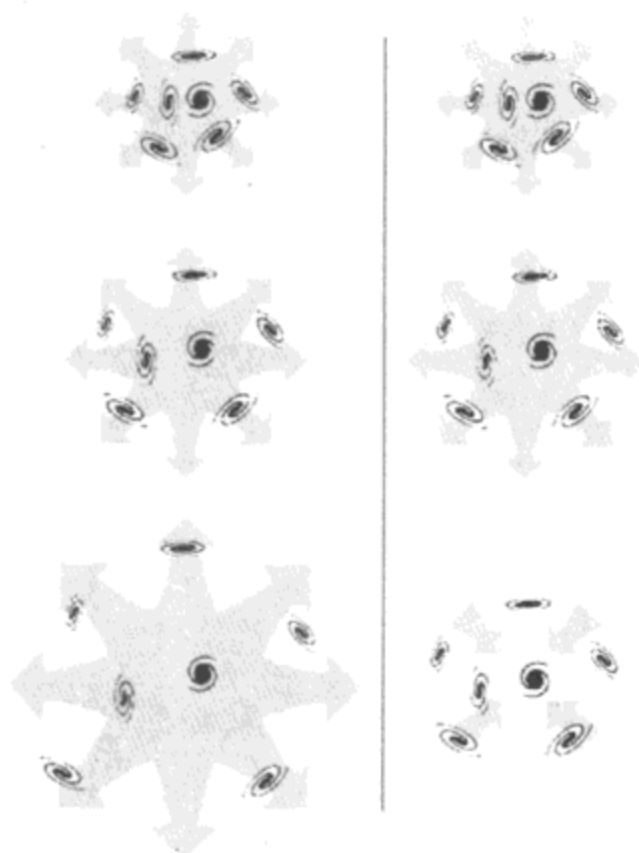


图 6.3 开宇宙和闭宇宙是什么意思？开宇宙 ($\Omega_0 < 1$) 永远膨胀，因为它所含的物质少，不能使宇宙膨胀减慢。闭宇宙 ($\Omega_0 > 1$) 有充足的物质阻止宇宙永远膨胀，而宇宙最终会坍缩。宇宙具有恰当数量的物质 ($\Omega_0 = 1$) 就会处于平衡，一直膨胀下去，但随着时间流逝，膨胀速度会越来越慢。

米/(秒·百万秒差距) [每百万秒差距每秒(钟)千米] 为单位。其次，我们需要估计宇宙的年龄，这是“计时零点”的变量，符号为“ T_0 ”。得到 T_0 的一种方法是“逆推”到时间的开始，即假定宇宙的膨胀一直以现在的速率进行，逆推宇宙的一切到同时处于一个地方的那个“时间点”。你也可以认为这就是时间开始的时刻(“计时零点”)——类似于按下宇宙的计时“跑表”，并且为 T_0 赋予一些可能的数值。为方便论述，若我们将 T_0 在 100 亿年到 200 亿年的范围内取值，我们会得出哈勃常数 H_0 分别为 100 千米/(秒·百万秒差距)、50 千米/(秒·百万秒差距)，也即其范围为 50~100 千米/(秒·百万秒差距)。

现在再提醒一下，离我们远两倍的一些星系的退行速度就快两倍。因此，假定膨胀速率是常数，当我们进行逆推计算，我们得出这些星系在某一时刻时基本上都在同一地方。设想两辆汽车同时开始一条公路奔驰，一辆的速度是 30 千米/小时，另一辆是 60 千米/小时。在任何时间，较快汽车跑过的距离是较慢汽车的两倍。但是，逆推过去，我们算出这两辆汽车在某一时刻同时从同一地方出发。计算从“大爆炸”以来的时间间隔 T_0 的方法是类似的。若我们取 $H_0 = 70$ 千米/(秒·百万秒差距)，则从“大爆炸”以来的时间间隔或宇宙的年龄近似于 140 亿年。[译注：当星系的视向(退行)速度 V 用千米/秒为单位，其离我们的距离 D 用百万秒差距为单位时，哈勃定律可以写为： $V = H_0 D$ 。若每个星系(因宇宙膨胀)总保持现在的退行速度，显然， $D/V = T_0$ 是星系从开始(宇宙“大爆炸”)退行到现在所经过的时间间隔，由哈勃定律可得出 $D/V = H_0$ ，所以 $T_0 = 1/H_0$ 这就是“大爆炸”发生以来到现在的时间间隔或宇宙的年龄。当然，若星系的退行速度(即宇宙膨胀速率)不是常数——或加快、或减慢，则需要复杂的方法来计算宇宙的年龄。]

H_0 值越大，宇宙的年龄越小；也就是说，宇宙膨胀得越快，它达到现在这么大所经历的时间间隔越短。但是还存在一个问题：如果不考虑引力对膨胀速率的影响而简单地“代入” H_0 值，就会高估宇宙的年龄，这是因为引力可以使膨

胀减慢。我们前面谈到宇宙的年龄 T_0 的取值范围很大，这主要是由于距离的不确定性、对宇宙中存在多少“物质”（宇宙的密度）的估计的不确定性以及宇宙物质的引力作用的不确定性所致。为了确定宇宙的真正年龄，仍有很多工作要做。如果不能准确地得出宇宙密度，那么就无法准确地确定 T_0 值。

膨胀的宇宙还有其他性质： Q_0 表示减速因子（宇宙膨胀减慢的速率），它可以用来检验对于不同距离的星系是否存在不同的准确哈勃关系； ρ_0 表示宇宙的临界密度，这是宇宙的膨胀最终停止所需的物质平均密度。如果我们估计出宇宙中现今的物质密度，那么，将它除以 ρ_0 可得到密度参数“ Ω_0 ”。如果 Ω_0 大于 1，宇宙就会停止膨胀并自身坍缩（即所谓的“大反冲”），也就是“封闭了的宇宙”或“闭宇宙”；如果 Ω_0 等于 1，那么宇宙就会继续膨胀，但在未来的膨胀速率会很慢；如果 Ω_0 小于 1，宇宙就会继续膨胀，即所谓的“开宇宙”。

如果引力使宇宙的膨胀速率减慢并达到现在的膨胀速率，那么，过去的膨胀速率必定是较快的。这里有几种“可能性”，而宇宙最终命运的问题（无限地膨胀、坍缩或可能的更新）是宇宙学中争论最激烈的问题之一。

在“旧”的标准模型下，“大爆炸”的第一时刻以符号 T_0 表示。从“大爆炸”开始的宇宙极早期，一切发生得极其快，即刻就发展成为极其密而热的宇宙（不透明的混沌汤）——所谓的“原始火球”。1948 年，天体物理学家的理论研究得出结论：原始火球存在遗迹，可能以微波背景的形式弥漫在整个宇宙。1965 年（译注：更确切地说应该是 1964 年），彭齐亚斯（Arno A. Penzias）和威尔逊（Robert W. Wilson）发现了这种信号，称之为“宇宙微波背景辐射”（CMB）。由于这一重大发现，彭齐亚斯和威尔逊荣获 1978 年诺贝尔物理学奖。

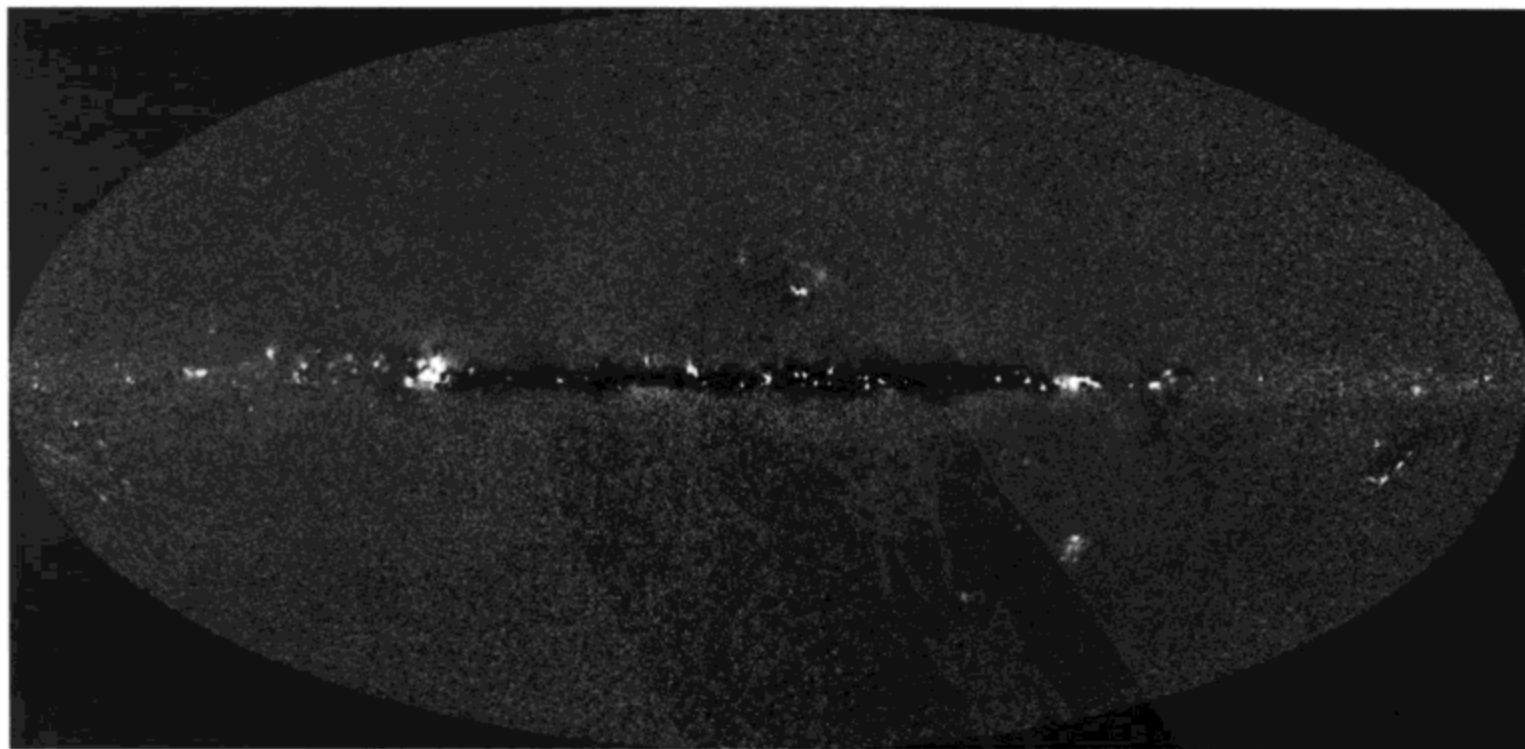


图 6.4 从微波源的测量中去掉我们太阳系和银河系的红外辐射后，余下的几乎是均匀的宇宙红外背景辐射。横过中心的那条线是去掉银河光后留下的。宇宙背景探测器（COBE）实验探测到了宇宙微波背景辐射，这是“大爆炸”第一时间的残余



图 6.5 室女座星系团离我们 5500 万光年，是最近的大星系团。它与附近的其他星系团和星系群（包括银河系所在的“本星系群”）一起组成更大的“本超星系团”。这幅近红外的拼合图的中间偏右有两个巨椭圆星系 M86 和 M84

作为原始火球的宇宙最初（大约在“大爆炸”后 10^{-43} 秒）由高能的基本粒子和高能光子组成。宇宙学家必须使用基本粒子物理学对这一时期进行研究。到“大爆炸”后约 $10^{-34} \sim 10^{-30}$ 秒，宇宙只有几厘米大小并且经过称为“暴涨”的迅猛膨胀阶段（从不到一个质子那么大开始而暴涨到甜瓜那么大）。到 10^{-6} 秒，基本粒子（称为“夸克”）结合形成中子和质子。“大爆炸”后，宇宙就一直在膨胀中，温度持续降低（变冷），密度持续变小。到“大爆炸”后的 1000 秒时，宇宙变得相当冷，同时完成了主要元素原子核的合成，这些元素是氢、氘（重氢，氢的同位素）、氦和锂，它们形成的比例是由普通物质（也称为“重子”物质，重子是包括中子、质子及其他大质量基本粒子的统称）的密度决定的。这些元素总量所占比例用符号 Ω_B 表示（下标 B 代表“重子”物质）。

在大爆炸后约 30 万年，开始形成宇宙的早期结构。最早的物质团块开始结合，这使得星系的形成以及星系团和超团等较大的结构的最终形成成为可能。

宇宙中的物质

星系团是宇宙学和星系演化研究中的重要研究对象，它们为天文学家提供了早期宇宙中物质分布的线索。观测来自星系团的光也有助于我们推测其他物质可能产生什么作用来影响宇宙的膨胀。

宇宙的最大已知结构是浩瀚“纤维”和成片的星系团和超团。这些团块无疑是人们通过宇宙背景探测器（COBE）所得图像上看到的宇宙各局部结构的遗迹，它们是宇宙暴涨所保留的极早期微小涨落。一旦在这些结构中形成原（始）星系，就进入了气体聚集为恒星的阶段，随后是恒星的演化及其牵连的恒星际物质、行星的形成和生命的孕育。

不管在宇宙的起源和演化上的争议情况如何，在宇宙学家想出宇宙全部如何 166
开始和如何结束的更现代的理论之前，仍然有很多的工作要做。天文学家还没有准确地得出 H_0 、 T_0 、 Q_0 和 Ω_0 的值，虽然 H_0 的测定取得了很好的进展，但密度参数（ Ω_0 ）则可能是一块硬骨头，这是因为有关“存在多少物质”和“这些物质是什么”都存在很多未知数。最大的未知数之一，且现今宇宙学家热衷于研究的领域是所谓的“暗物质”的神秘“东西”是否存在。在确定宇宙的密度（这会影 167

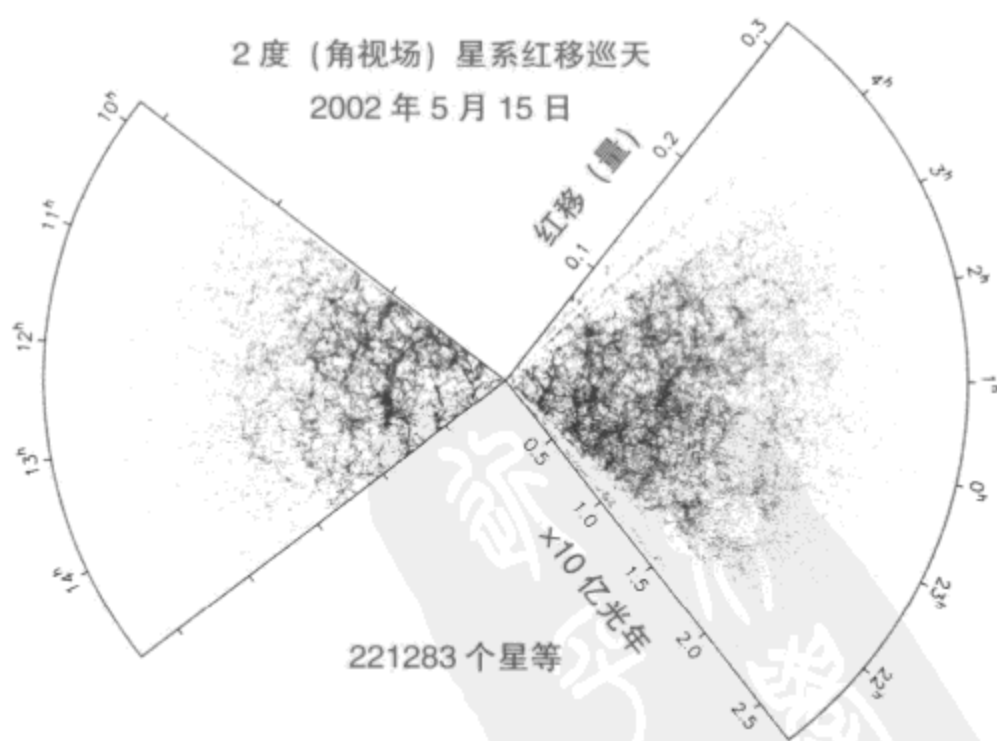


图 6.6 这些蓝色锥表现了 221283 个星系的三维距离图。根据“2 度（角视场）星系红移巡天”得到的红移所推导出的距离达到了 250 万光年。这些星系在空间的分布似乎呈海绵状，这意味着比重子物质和暗物质还多得多的“东西”在影响着这些星系的分布。这种“东西”可能是“暗能量”，但尚未直接探测到

宇宙的膨胀速率)时,“暗物质”就是你看不到但却可能影响你的“东西”。

为了更好地理解什么是暗物质,我们可以先看看哪些物质不是暗物质。我们能看到的每件物质都不是暗物质,可见的物质称为重子物质(或平常物质),它们只是宇宙组成物的一小部分。几十年来,天文学家已经知道宇宙中有很多物质以“暗物质”的形式存在,但却不知其“量”[译注:即既不知道暗物质是什么(质),也不知道它们的数量]。

如果我们不能看到暗物质,我们怎样知道它在哪里?暗物质的存在是必要的,因为它的引力作用于星系的运动。研究星系运动的天文学家预料,星系的外围比内区转动得更慢,但他们的观测结果却不支持这一推论,而是使他们转而推测“存在某种看不见的力在作用或约束星系的运动”。宇宙学家们搜寻了发光的源,但却没有找到足够多的物质来解释星系被约束的运动和所估计的宇宙密度。我们能观测到“某种物质”的作用,但却没能看到“这种物质”(即“暗物质”)。

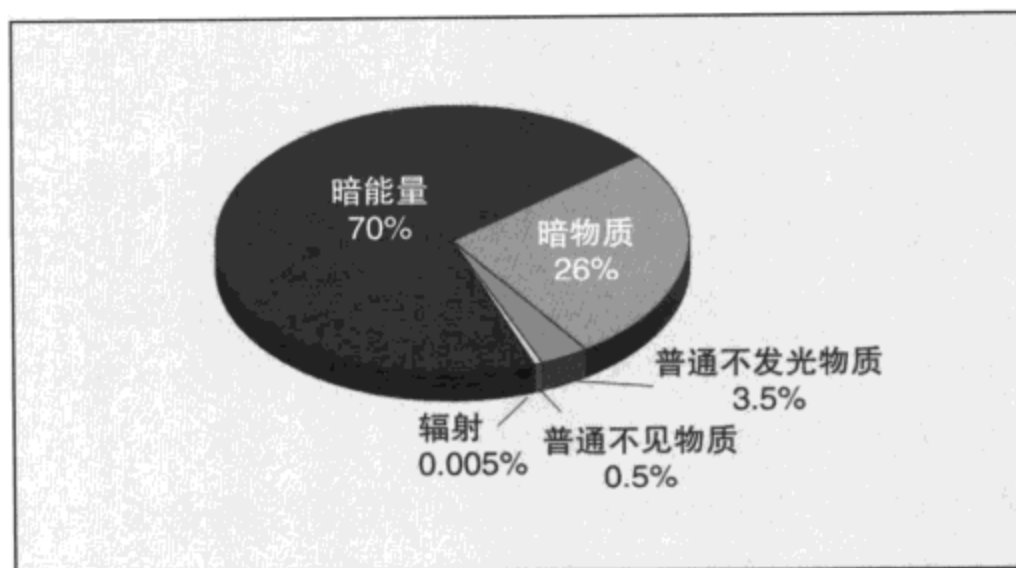
如果暗物质与星系共存,那么,在更大的宇宙空间存在暗物质吗?我们应在哪里找寻暗物质?测量星系在广阔空间的分布并将其与计算模型进行比较,可能有助于我们找到答案。近几年来,天文学家开展了不同“深度”的宇宙巡天勘测,普查星系分布情况而使这种比较更为正确。“2度(角视场)星系红移巡天”观测了约25万个星系的红移,用所得数据对宇宙进行了更准确的计算机模拟。模拟显示:暗物质以巨大引力把正常重子物质拉在一起;换句话说,哪里有发光的物质,哪里就存在看不见的大量暗物质而使其作用表现出来。

168 由于我们不能直接观测到暗物质,因此我们对暗物质究竟是什么就可能有多种推测,有些名称是想象的:可能是晕族大质量致密天体(MACHOs),一种很暗的恒星或类似木星的天体,它们可能都在星系周围的球形云中;也可能是黑洞,如果黑洞的分布比我们预料的范围大得多,我们也可能将其认为是暗物质;还可能是异常粒子——“弱相互作用大质量粒子”(WIMPs),在理论上它们因有足够大的质量而可以被认为是暗物质,虽然还没有发现这种粒子,但粒子物理学家认为它们确实存在;再有一种可能是“轴子”,但是它们也仍处于理论探讨阶段。如果弱相互作用大质量粒子和轴子真的存在于星系外部,那么它们可能是在“大爆炸”后不久的致密的、热的早期宇宙的遗留物。

就在几年前,宇宙学似乎还是一门较简单的学科。正如我们已经讨论的,我们需要的两个最重要的数字是哈勃常数 H_0 和宇宙的物质密度 ρ_0 。哈勃空间望远镜的“关键任务”之一就是测定 H_0 到误差小于10%。在数年研究之后,天文学家确定 H_0 的新值为70千米/(秒·百万秒差距)左右。

现在,我们需要考查膨胀速度为常数的假定。我们知道,物质的引力作用使宇

图 6.7 如果将宇宙中的能量和物质画在饼状图上,那么它们的现在比例就如此图所示。宇宙并不是只由我们能看见的“东西”组成,实际上,宇宙中最多的应当是“暗能量”,平常的不发光(重子)物质只占总量的、甚至“暗物质”的小部分。大致结果是暗能量(也称为斥力)占 2/3,总物质占 1/3



宇宙的膨胀减慢,因此我们必须求出存在多少物质。如我们前面讨论的,如果没有足够多的物质,膨胀就会永远继续下去。如果存在的物质太多,宇宙就会自身坍缩回去。如果物质数量适中,我们需要解答的问题是它们是否一直在减慢宇宙的膨胀。

有一些测量物质的方法能够帮助我们确定宇宙有多老和宇宙在未来将发生什么。例如,在恒星际物质中的氘与氢现在的比率(D/H)是普通物质数量的敏感指标。对穿过恒星际物质的、来自恒星的星光的结果告诉我们:重子物质的数量很少。以临界密度来说,普通物质的数量大致是宇宙总质量的5%。如果重子物质是宇宙中唯一类型的物质,那么,宇宙的密度就比临界密度小很多,因而宇宙会永远膨胀下去。

然而,星系团的研究得出:需要暗物质来把它们保持在一起。这意味着暗物质必须是“冷的”,以便聚集在这些星系团内。近年来天文学家观测遥远光源的紫外和X射线光谱中的暗吸收线时,发现了弥漫的平常物质(重子物质)。这些所谓的遮蔽(吸收)效应是被称为“星系际雾”的一种物质(似乎存在于“本星系群”内)所产生的。因此,似乎至少可以发现为保持这些星系团在一起所需的部分物质。

此外,还有所谓“热的”暗物质,它们不会是聚集的。宇宙中的能量和物质必然有30%是处于冷的暗物质形式。如果真是这样,那么宇宙的膨胀就很难被引力所减慢,而 T_0 仍近似于140亿年,膨胀会一直进行下去。

膨胀的宇宙和能量为主的新标准模型

169

虽然我们已讨论的内容可能是大约1997年以前有关宇宙早期演化理论的一个合理总结,但是存在的一些问题导致宇宙学家进行一些重新思考。一些观测证据和理论预言表明: Ω_0 等于1。如果情况真是这样,那么,我们的宇宙物质的名单上就漏掉了一大块!1998年,超新星的研究表明宇宙膨胀不是减慢了,而实际上是

加快了,于是宇宙学的每件事都改变了。从宇宙微波背景辐射研究得到的详细结果证明 Ω_0 很接近 1;换句话说,宇宙有平坦的几何学。我们知道了现今宇宙膨胀在加速,这有助于在观念上进行一个大的转变:宇宙中确实存在我们漏掉的“物质”。

这时,读者会顺理成章地提出一个问题:“我们究竟如何能够知道这些事情,并完全可信地建立宇宙模型?”答案在原则上是简单的,而在细节上是复杂的。事实上,甚至很久以前的事件和过程都在宇宙中留下了踪迹,如果可以测量和了解这些踪迹,我们就可以推测宇宙的早期历史和现在的状况。例如,宇宙微波背景辐射是约 30 万年到 40 万年前的宇宙遗迹。这种遥远过去的辐射到达我们时已发生了红移,其黑体(绝对)温度为 2.7 度。

现在,让我们对图 6.7 中宇宙组成的现时概括进行进一步说明。我们从超新星和加速膨胀开始。Ia 型超新星属于宇宙中最亮天体之列,可以作为“标准烛光”(图 6.8)。Ia 型超新星原来是双星的一颗白矮星。基本上,一颗恒星演化到白矮星时,其质量不能超过 $1.4M_s$ 。如果伴星抛出来的物质落到白矮星上而使其质量超过 $1.4M_s$,白矮星就坍缩而触发剧烈的热核爆炸,成为 Ia 型超新星,在其亮度衰退后不留下遗迹。事实是所涉及物质基本上都产生“标准烛光”(即超新星爆炸)。如果在用其他方法(例如造父变星法或图 6.2 中的其他方法)定出距离的星系内发现了 Ia 型超新星,小的差别可以根据光变曲线校正。这种比较并不是很简单的,目前已由两个研究小组完成,这两个研究小组得出的宇宙膨胀速率表明宇宙现在是加速的。

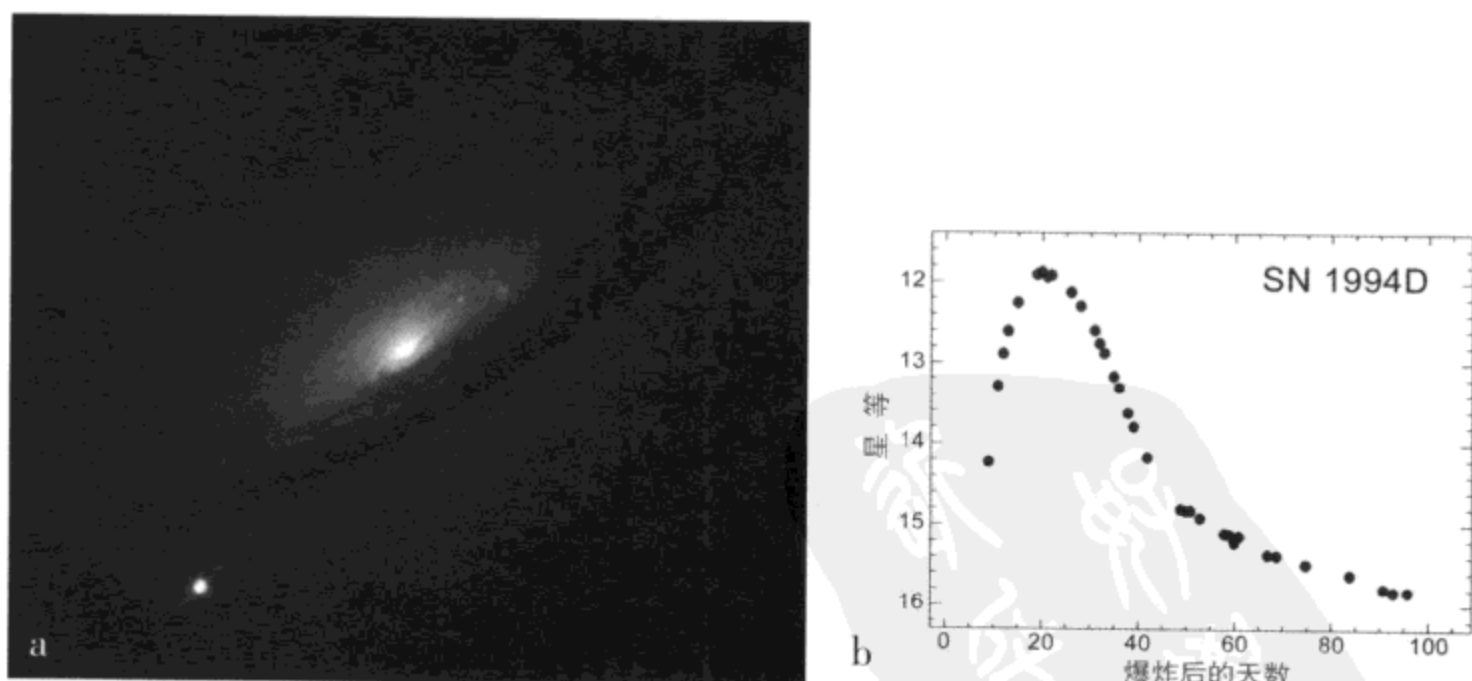


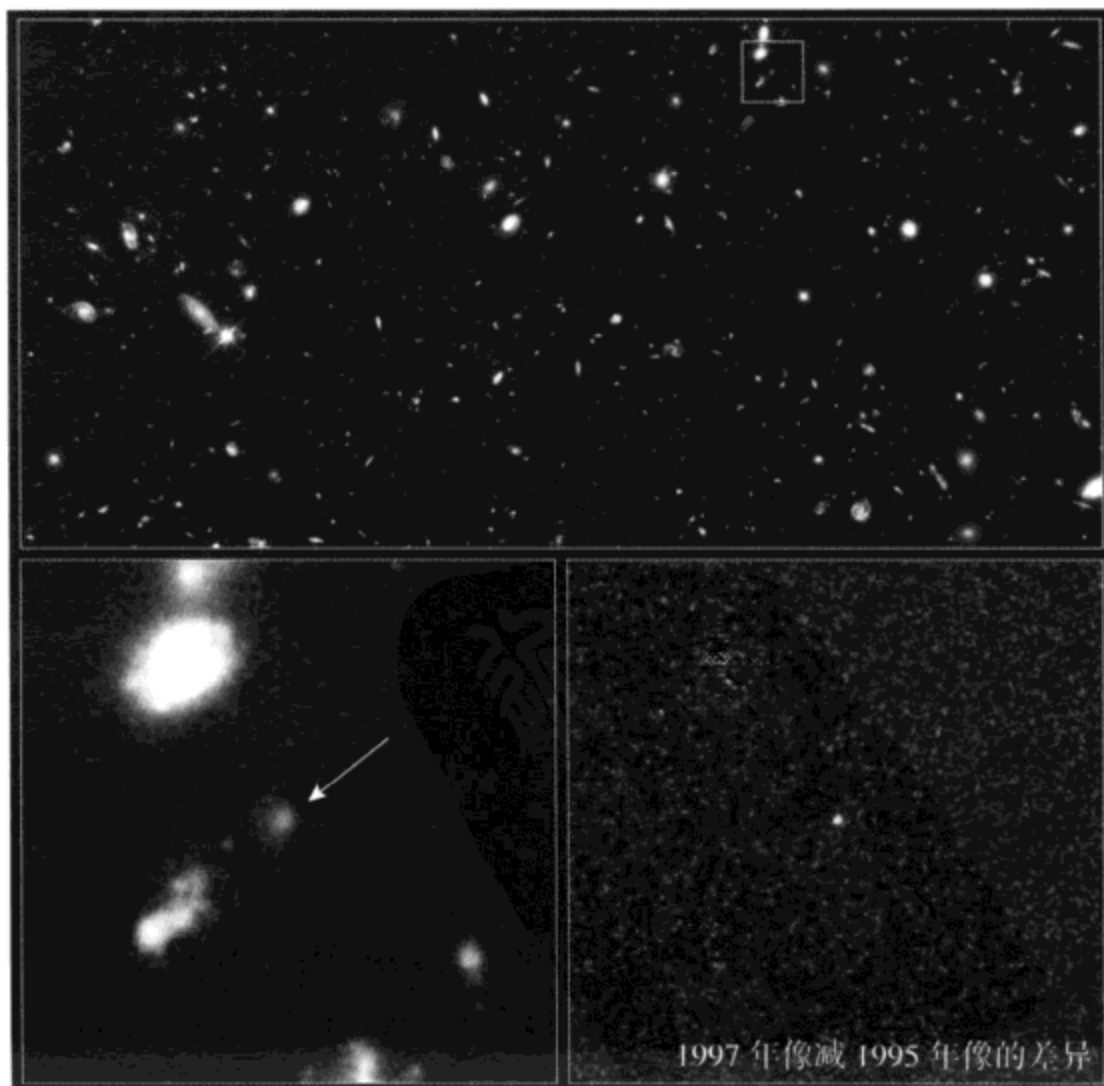
图 6.8 图 a 为超新星 1994D。它是星系 NGC 4526 外围的亮天体,是可见的。这是一颗 Ia 型超新星,当附近伴星抛出来的物质落到白矮星表面时,后者就爆炸为超新星。人们在很多星系中发现了此类超新星,并把它们作为“标准烛光”——距离的指标并可用来测定宇宙的膨胀速率和几何学。图 b 为超新星 1994D 增亮和衰退的星等和光变曲线形状,根据它,我们可以定出超新星爆炸事件的光度和它的距离

什么东西可能引起宇宙膨胀速率增加呢？现在,最好的答案是我们称为“暗能量”的宇宙斥力。多年以前,爱因斯坦(从广义相对论的引力场方程)推求静态(但不稳定)宇宙模型时,为了克服数学上的困难,引入了一个宇宙常数并以希腊大写字母 Λ 表示,但他后来又放弃了并称“宇宙常数是他的最大错误”。现在最好的(但并非完美的)模型是 Λ (宇宙斥力)和上述冷的暗物质的一种组合。

我们可以对这一模型加以检验。宇宙常数和引力的相对作用随宇宙膨胀而变化。在宇宙早期,同样数量的物质密集在一个小体积内,且实际上能够克服宇宙学常数的加速作用。因此,在最初,宇宙的膨胀是慢速的。但是,当宇宙已膨胀到较大时,小但定常的 Λ 作用转化为优势,因而膨胀加速。检验这种看法需要用到距离遥远的、(因而在)时间上更早的 Ia 型超新星。目前人们已经发现了一颗这样的超新星(图 6.9)。[译注:到 2005 年,已发现 300 多颗 Ia 型超新星,观测结果表明,在 50~60 亿年前,宇宙膨胀就加速了。]与处于宇宙膨胀加速时期的超新星相反,在宇宙慢速时期的超新星比我们预料的亮。将这些遥远的超新星作为标准烛光进行的仔细计算仍然证实宇宙的年龄约为 140 亿年。

因为我们现在必须考虑宇宙中的暗能量 (Λ) 和物质的作用,因此前面讨论的 Ω_0 也必须再包括暗能量 (Ω_Λ) 和物质 (Ω_{matter}) 两项,因此 $\Omega_\Lambda + \Omega_{\text{matter}} = \Omega_0$, 而新

图 6.9 超新星 1997ff 发生在宇宙大爆炸后不久的慢速膨胀时期,后来宇宙的膨胀才开始加快。而这颗超新星提供了膨胀宇宙现今观念的附加证据。在这组图片中,上方是超新星 1997ff 所在区(小方框)的部分哈勃深场,左下方是该超新星的客居星系(箭头所示),右下幅是差异像(不同时间的两幅像作相减处理所得),斑驳的红色背景是人为处理时所留下的

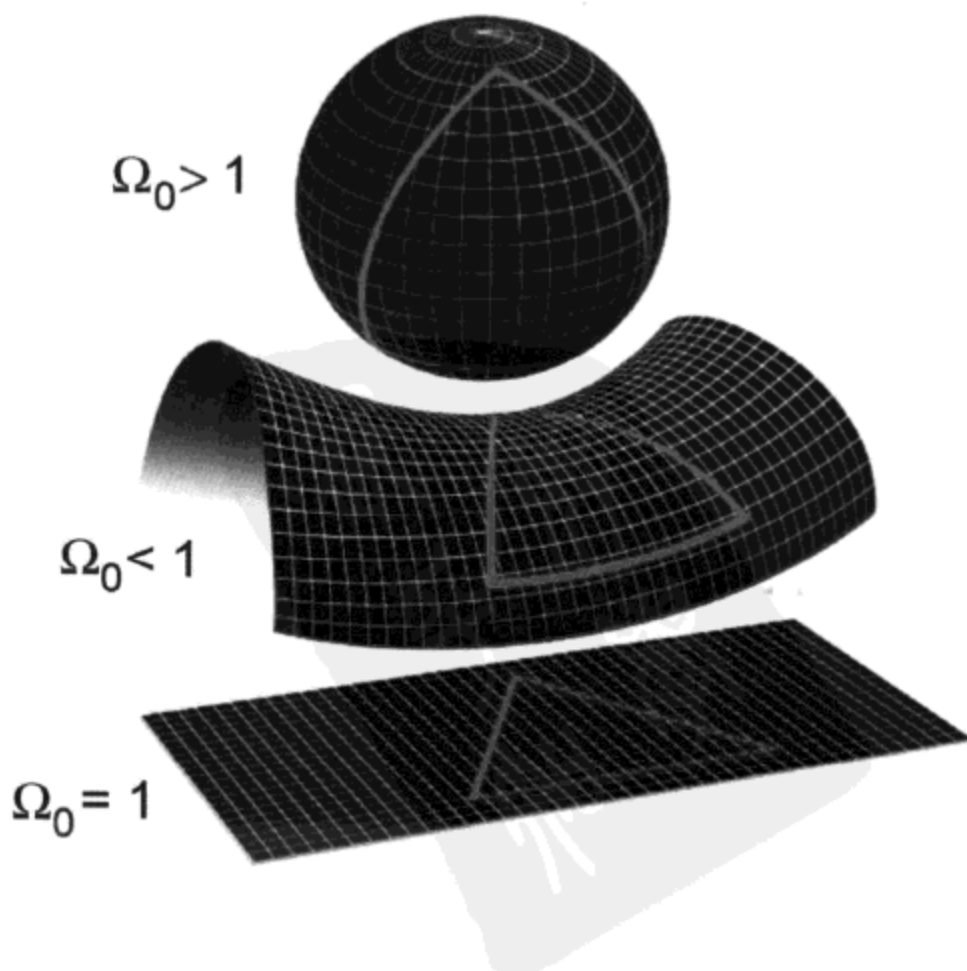


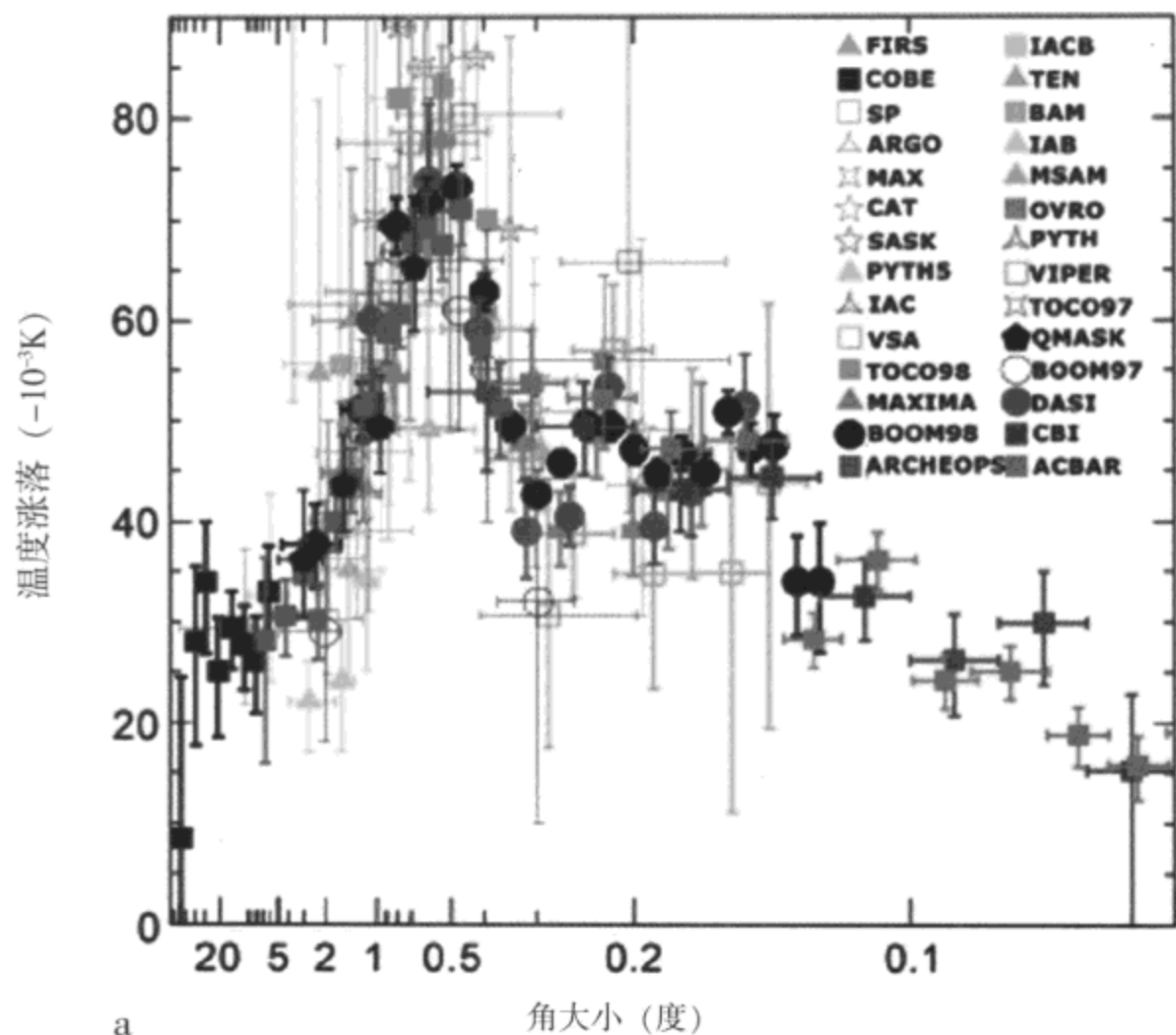
的 Ω_0 值确定宇宙的几何学，如图 6.10 所示。特别是，我们得到具有 $\Omega_\Lambda + \Omega_{\text{matter}} = \Omega_0 = 1$ 的宇宙的平坦几何学。

宇宙微波背景辐射是宇宙学的一个“信息金矿”。在宇宙极早期的暴涨阶段，宇宙中存在不完全均匀性——“涨落”，因而产生一些块体并成为后来星系形成的“种子”。在宇宙的很早期的高密度和高温条件下，辐射和（实物）物质是完全耦合的。随着宇宙的膨胀，密度变小，温度降低。在大爆炸后 30 万年到 40 万年时，宇宙已变得相当冷，质子和电子结合在一起而形成中性元素，它们不再阻碍光的传播，基本上所有的空间变得相当透明，或者说辐射（光子）退耦了。于是，那时自由传播的这些光子辐射成为可见光，而我们现在看到它们因宇宙膨胀而红移了的宇宙微波背景辐射。宇宙学家已进行了宇宙微波背景的很多不同分辨率的测量，这些测量表明宇宙微波背景辐射几乎是均匀和各向同性的。然而，分布不是完全平坦的，还存在一些不规则性——预示着现今星系分布的复杂网络结构。所有这些（通过位于智利的微波望远镜“宇宙背景成像仪”进行的）观测表明，微波背景辐射的不均匀性就反映早期宇宙中“团块”的块体和纤维。

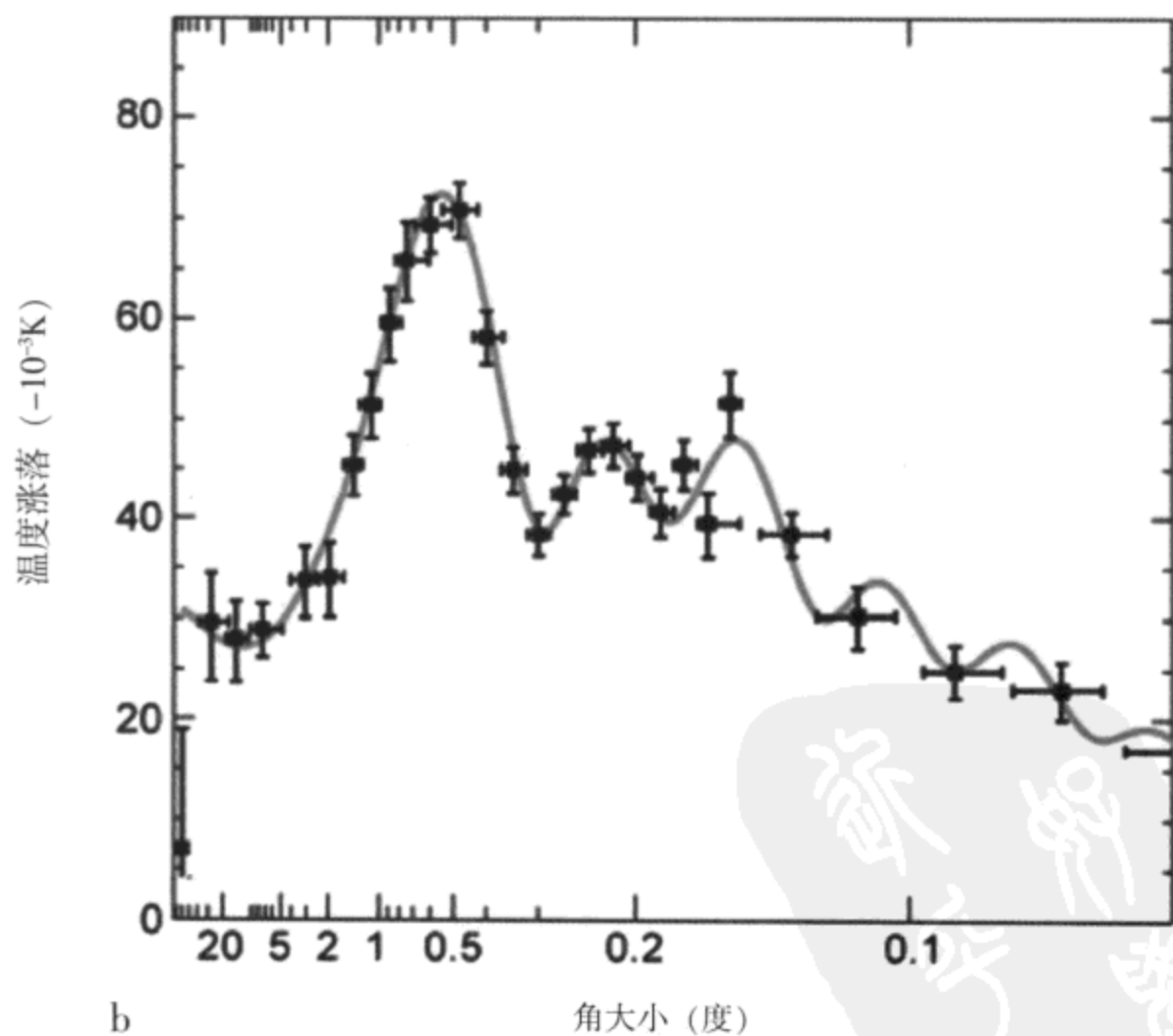
172 在考察所有这些方法的结果后，现在的宇宙演化过程概括如下：宇宙的一切以“大爆炸”（the Big Bang）开始，而后不久就“暴涨”而大小猛增 10^{40} 倍；暴涨使原来的微小涨落放大为密度浓聚区，最终形成星系；暴涨也使 Ω_0 非常接近 1；而后，随着宇宙的膨胀，温度降低，密度减小；（涉及平常物质的原子）核合成而产生宇宙中的轻元素；当重子的密度减到足够小，物质和光辐射退耦（它们不再耦合在一起）；（光）辐射因膨胀而红移、成为宇宙微波背景，及时向

图 6.10 为了理解 Ω_0 对宇宙结构的作用，想象宇宙是由 Ω_0 值确定的一系列几何形状。我们平常的（二维）空间概念看起来是平的、类似于这里所示的平宇宙（ $\Omega_0 = 1$ ）的情景。闭宇宙是有限的、类似于 $\Omega_0 > 1$ 情景的球。开宇宙（ $\Omega_0 < 1$ ）看起来像奇特的马鞍形状。思考几何学的另一个方法是用平行线术语来描述。在平面几何学中，局部的平行线像火车铁轨那样延伸到远方也总是平行的，保持相同的间距。但是，对于闭宇宙，局部的平行线延伸到远方会相交，就像地球上的两条经线相交于南北两极；对于开宇宙，局部的平行线延伸到远方会发散开。不同的几何学还可以用图上的红色三角形来说明：对于平宇宙（ $\Omega_0 = 1$ ），三角形的三个内角之和等于 180° ；对于闭宇宙（ $\Omega_0 > 1$ ），三角形的三个内角之和大于 180° ；对于开宇宙（ $\Omega_0 < 1$ ），三角形的三个内角之和小于 180° 。





a



b

图 6.11 宇宙背景辐射的联合测量显示了早期宇宙的更多信息。图 a 是多次测量反映的涨落强度与其相应角大小的关系。图 b 是对各观测结果的加权平均，红色曲线表示由平常物质、附加（暗）物质和暗能量混合构成的宇宙模型所预言的涨落关系，十字棒是误差棒，表示测定的不确定范围

前穿过数光年，传递有关早期宇宙结构的信息；起初，由于引力，宇宙的哈勃膨胀较慢，但当宇宙学常数占主导地位时，膨胀加快；宇宙可能将一直膨胀下去，但现在不能确切地预报宇宙的最终命运。

我们对宇宙的了解仍在继续迅速地深入。“威尔金森微波各向异性探测器”(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 简称 WMAP) 已经得到了宇宙最早光(辐射)的第一批详细的全天图！它捕获的微波(光)辐射来自“大爆炸”后的 38 万年。通过用一个模型拟合观测，宇宙学家根据这种(光)辐射确定了宇宙学参数。宇宙的年龄(T_0)为 137 亿年。 Ω_0 值近似于 1，支持发生过暴涨的观点。当然，宇宙有平直的几何学，而通过这些资料导出的宇宙成分是：暗能量占 73%，暗物质占 22%，平常(重子)物质占 4.4%。这些不同寻常的结果与我们现在的了解是一致的，但似乎提供了空前精确的信息。人们期望威尔金森微波各向异性探测器为对宇宙早期的研究继续提供更有价值的信息。

图 6.12 微波巡天的“威尔金森微波各向异性探测器”(WMAP) 为我们提供的宇宙“婴儿图像”。椭圆形是全天的投影，红色表示天空较热区域，而蓝色表示较冷区域。WMAP 可以记录千分之一度的温度涨落，这些涨落是产生我们现今所见宇宙结构(星系团，等等)的“种子”。用宇宙学模型解释这些温度涨落，可以提供宇宙学(描述我们的宇宙的)参数

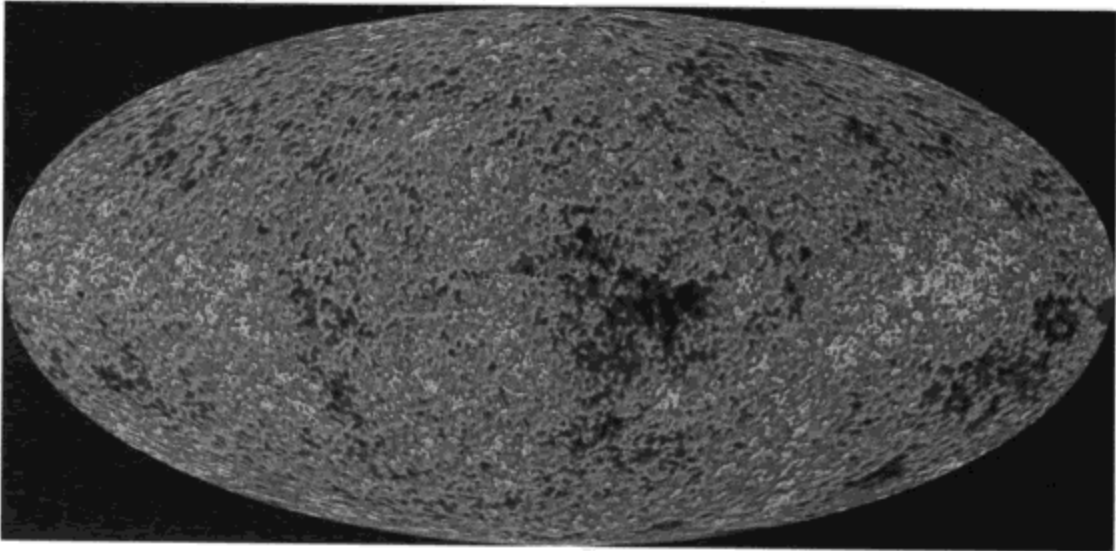
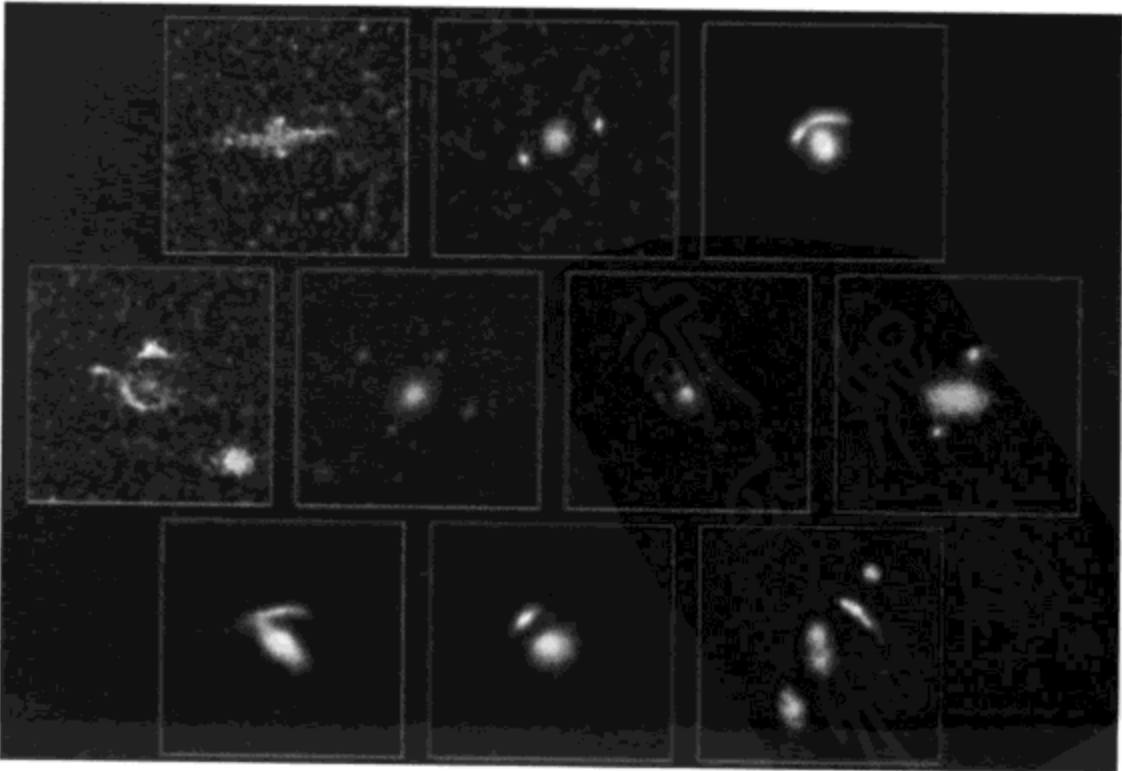


图 6.13 宇宙学家用哈勃空间望远镜对很多引力透镜进行观测，并从中选出了“十佳”形状。引力透镜的形状主要取决于视角和起透镜作用天体的大小



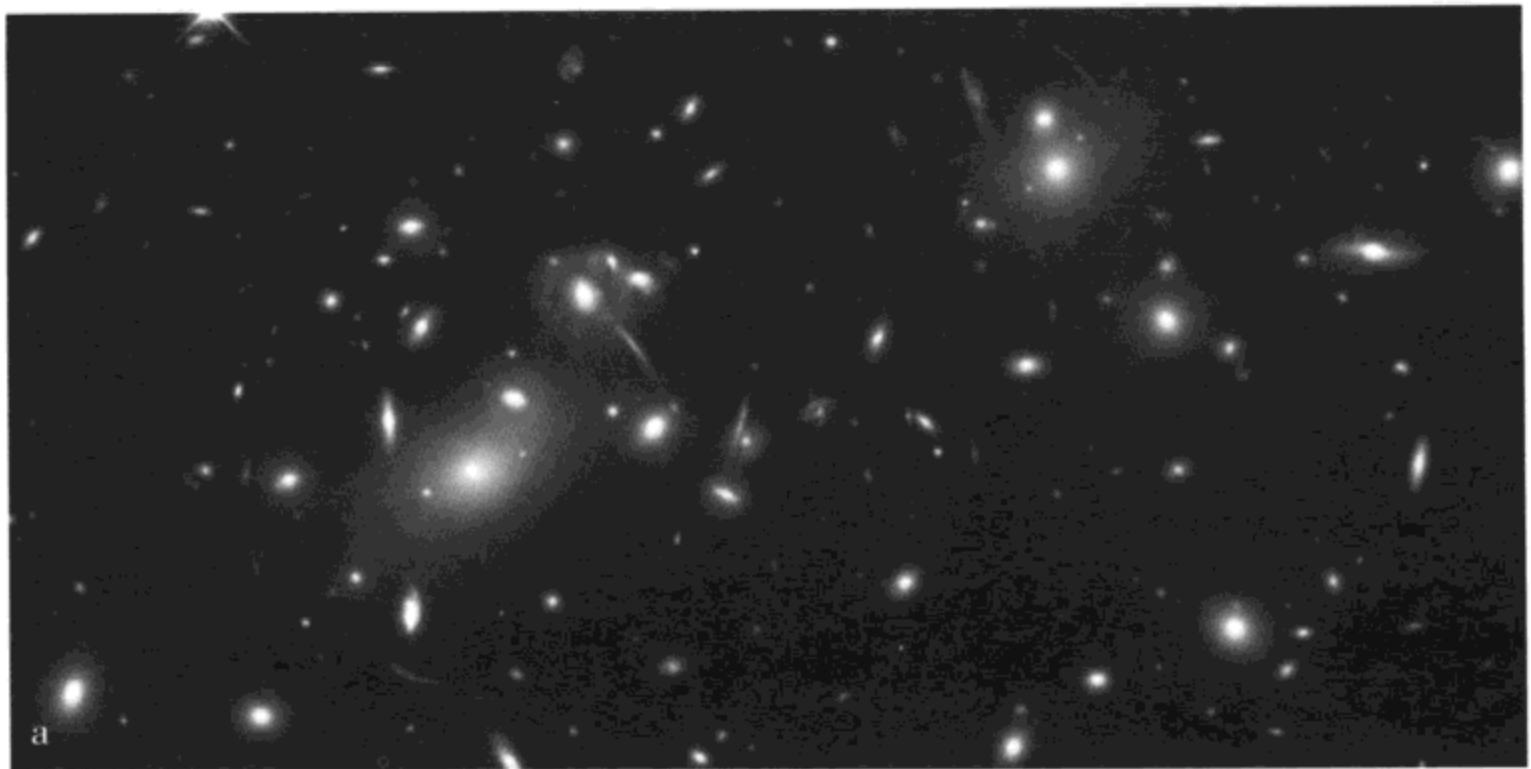
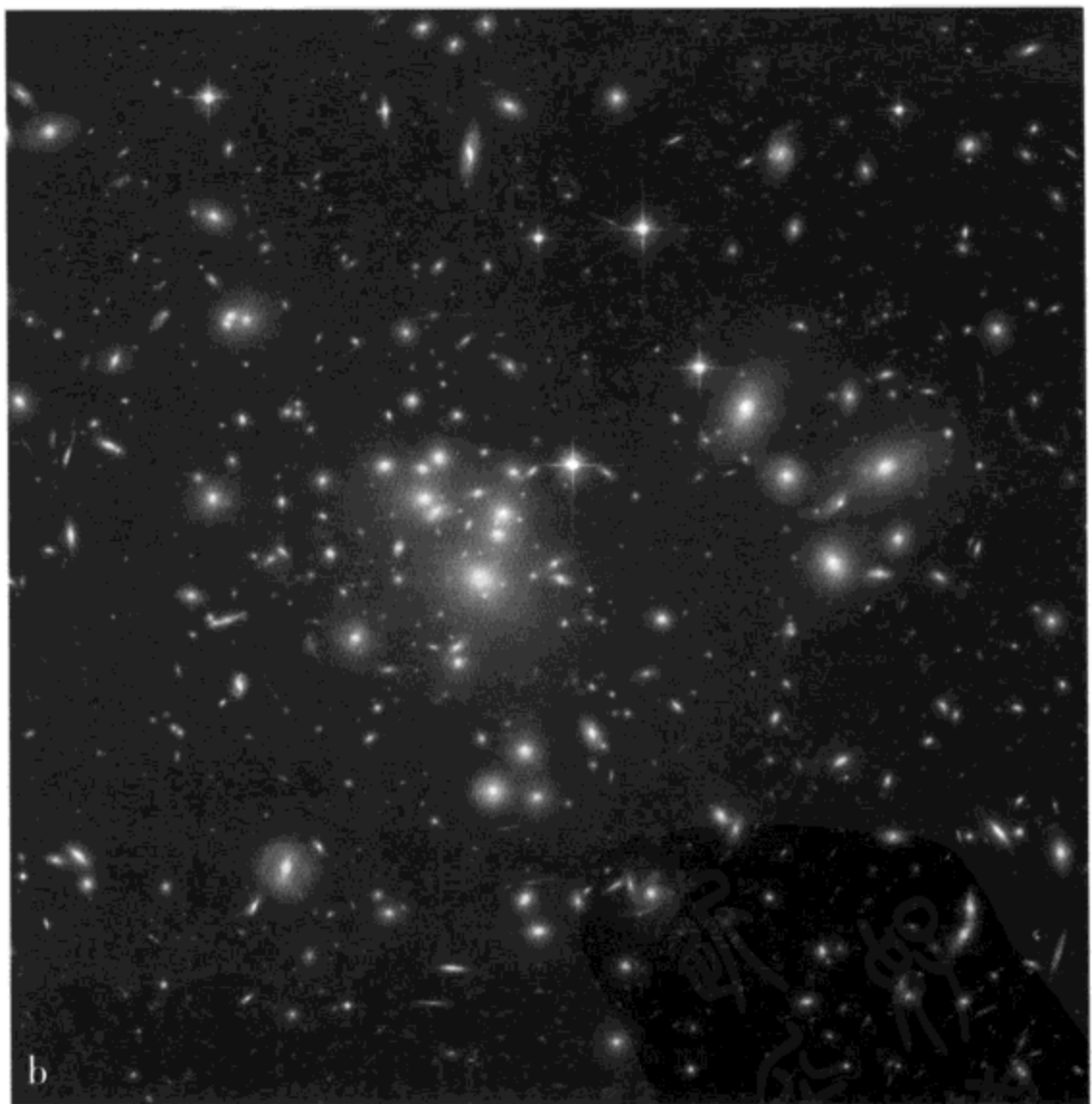


图 6.14 图 a: 富星系团 Abell 2218 充当一个大质量的引力透镜。该星系团的质量是如此之大、如此致密，以至于使遥远众星系来的光弯曲而呈现光弧。在宇宙尚在现在年龄的 $1/4$ （约 30 亿年到 40 亿年）时，这些星系就存在了。由于我们观测到的是这些星系很年轻时的情况，因此光弧可以用于观测这些遥远星系内的恒星形成区。图 b 是宇宙学家用哈勃空间望远镜观测的另一个大质量星系团 (Abell 1689) 的中心，宇宙学家认为它是迄今发现的最强力的引力透镜。哈勃空间望远镜对它观测了 13 小时以上，空间深达 22 亿光年。星系团的万亿颗恒星加上相关暗物质的引力就如 200 万光年宽的“透镜”，使更遥远星系的光弯曲和放大，扭曲它们的形状且造成个别星系的复杂像



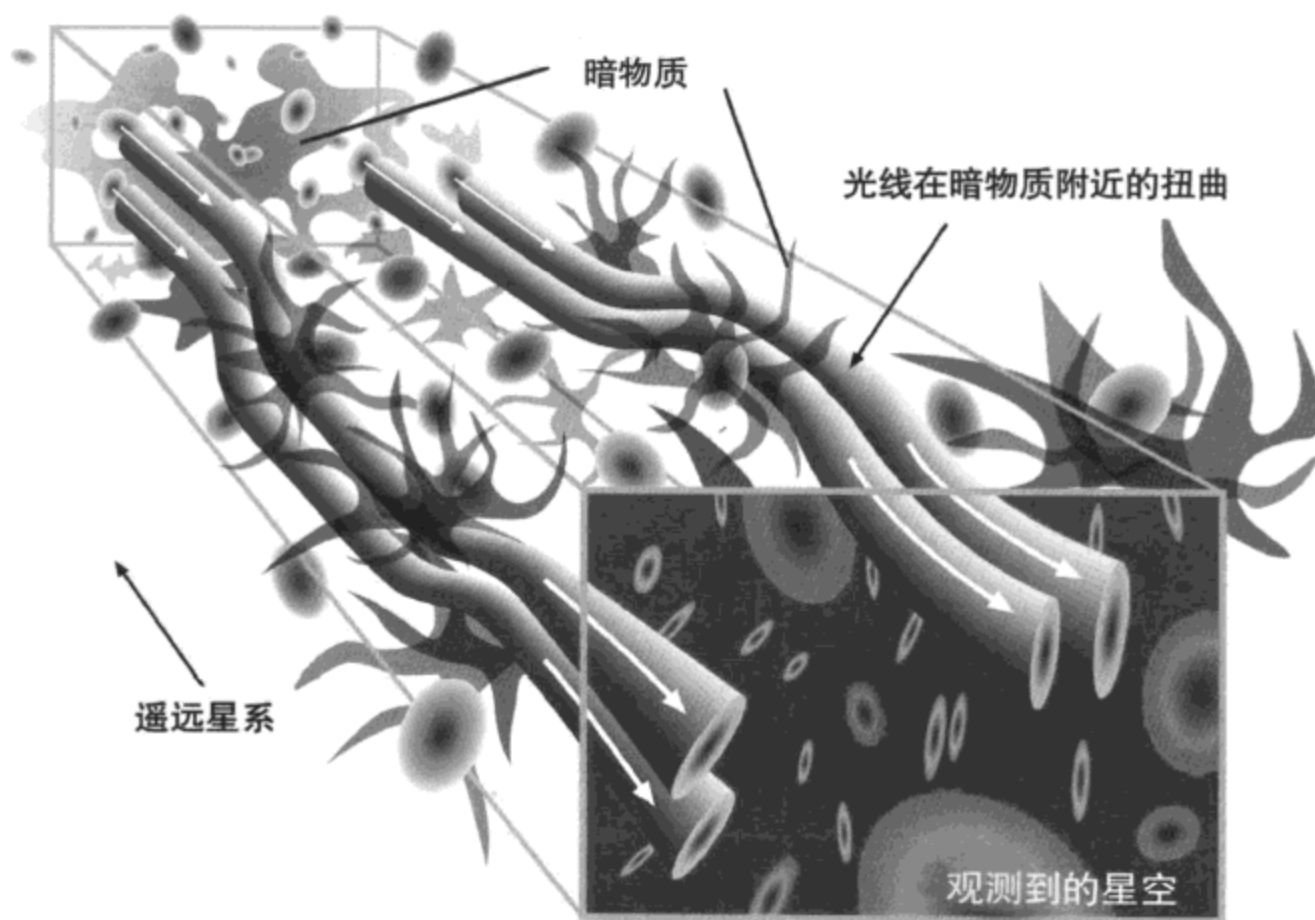


图 6.15 在遥远星系与我们之间的暗物质扭曲星系的观测像。来自遥远星系的光束在旅途中经过充满暗物质块的空间。此图是所谓的“弱引力透镜”（引力透镜作用不足以强到形成多重像或弧，而仅扭曲像）的示意图。来自遥远星系的光束在途中的每次弯曲致使我们观测的像扭曲。我们最后观测到的星系像的形态包含了光束所遇引力透镜作用天体的大小和质量的信息。这里画了两个在天空投影方向靠近的星系，它们的光束沿相似路径传播，且两光束的引力弯曲也相似，两光束在穿越暗物质聚集区时受到相似的引力透镜作用。引力透镜作用天体的质量越大，遥远星系像的扭曲越严重。通过对遥远星系像的扭曲进行修正，宇宙学家就可以估计出产生扭曲效应的暗物质数量，并对宇宙中的暗物质数量做出较好的推测

图 6.16 这个公认的复杂图概括了很多种估计宇宙中暗能量的密度 (Ω_Λ) 和物质的密度 (Ω_{matter}) 的方法及其对宇宙未来的应用。图中，对应于 $\Omega_{\text{matter}}=0.2$ 的“下限线”，没有相应的“上限线”，因为不集中于星系团的非重子物质还没有准确测定，箭头标志所有估计结果会聚区域。图中：BBN——早期核合成，WL——弱引力透镜

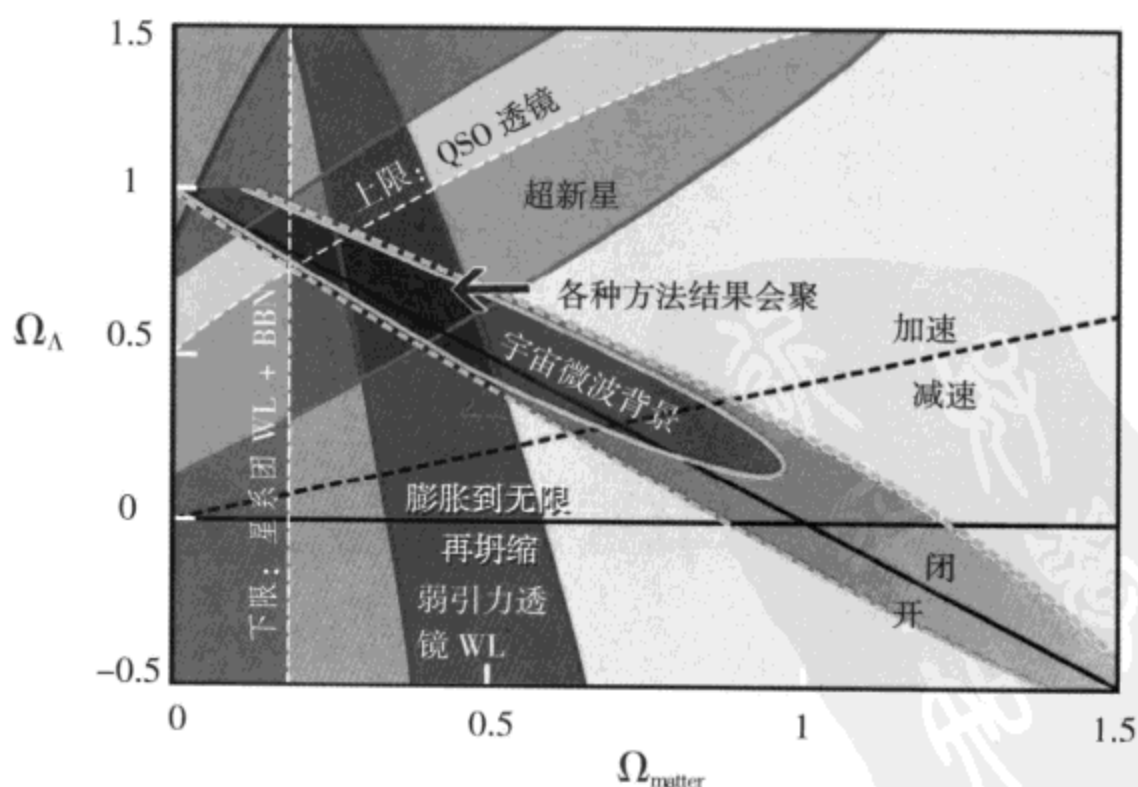
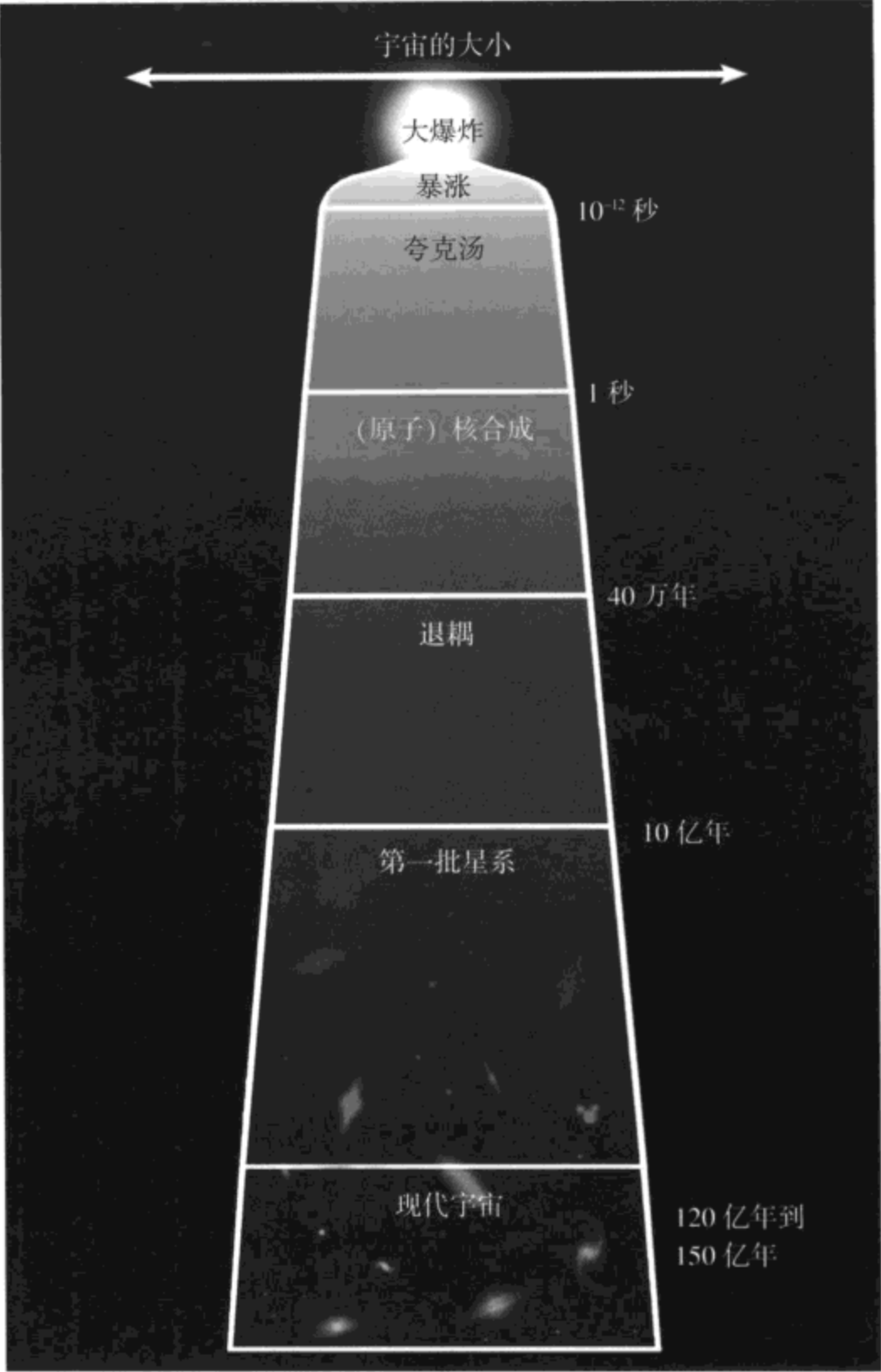


图 6.17 如果我们能够拍摄一幅宇宙学的“快照”，这幅宇宙的概括总结图示可能是最佳候选。它从大爆炸开始，暴涨后，宇宙中形成了高能光子以及由电子、中微子和夸克（质子和中子的“建筑砖块”）组成的“夸克汤”。（原子）核合成时代生成氢、氦和少量锂的原子核。当发生退耦时，物质和辐射分开，所释放的早期辐射成为我们观测到的宇宙背景的“微弱耳语”——它们形成了我们现代宇宙的背景



现在，宇宙学是建立在很多精确观测领域基础上的天文学分支学科，但是也有令人烦恼的一些方面。在我们宇宙的组成图（图 6.7）上，最大的两项是暗能量和暗物质，但我们从未看到过它们，而只是通过测量有关效应来推断出它们的存在。而且，虽然存在宇宙刚开始后发生过暴涨的强有力证据，但是还不清楚究竟是什么造成暴涨。

引力透镜

爱因斯坦的广义相对论是计算“大爆炸”宇宙演化的基础。很有趣的是，这一理论也导致帮助我们研究宇宙的一些令人惊叹的效应。按照广义相对论，一个

大质量天体附近的空间（严格地说是“空间-时间”，简称“时空”）被该天体弯曲了。弯曲的时空产生如同引力的基本效果，可以导致运动轨迹的改变。实际上，对于行星，广义相对论和牛顿力学得到的结果只有微小差别。

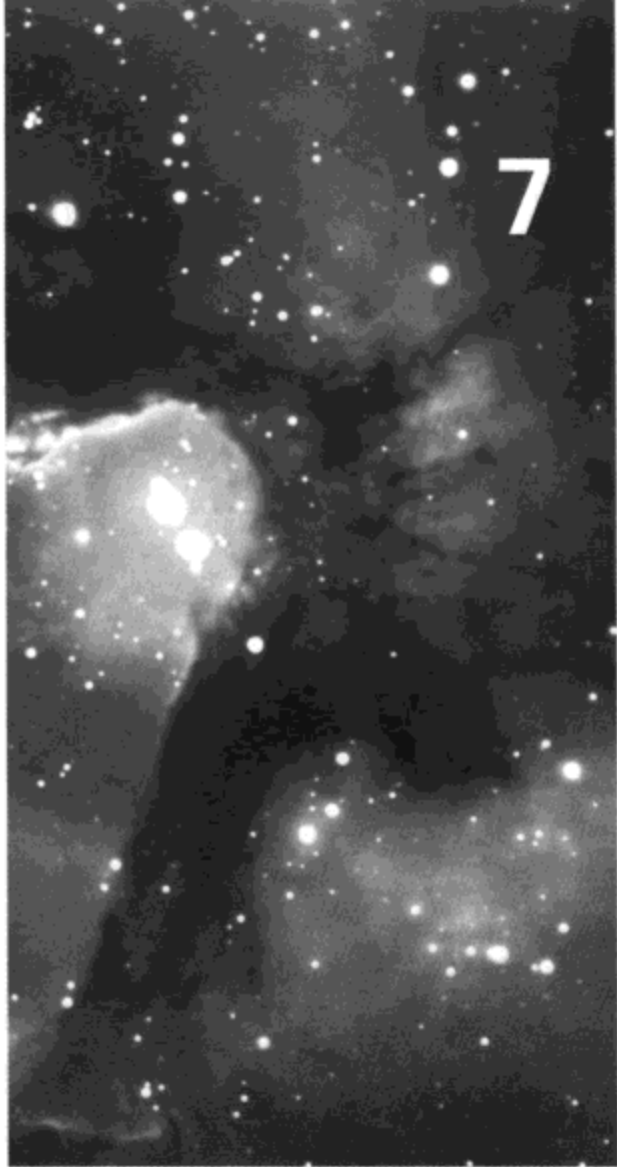
这种空间弯曲有另外的结果。从大质量天体后面的某遥远天体发射出来光会改变其方向（即光线弯曲），以致观测者看上去好像遥远天体从它的真实位置移开了。如果遥远天体是延展（即有视面）天体，它的像可能变形，这种现象称为“引力透镜”效应。在我们简要地讨论宇宙的几何学时，我们曾论及几何学可能怎样影响或改变天体的形貌。因此，我们可以由观测引力透镜效应来探测宇宙的性质。在理论上，任何具有质量的天体都可以成为其他天体的引力透镜。然而，实际上，探测小于恒星或星系尺度的引力透镜效应几乎是不可能的。

发现不同的引力透镜效应是令人激动的，研究这种现象对得出很重要的宇宙学成果——尤其是寻找暗物质提供了潜在的可能性。在宇宙中传播的光线可能在路途上被暗物质弯曲，就像重子物质的星系团可以使光线弯曲一样。当光线弯曲程度较小时，称为“弱”引力透镜效应。类星体受到的强引力透镜效应和别处的弱引力透镜效应也都可以提供宇宙学模型的重要约束条件。

所有结果意味着什么？

目前，宇宙学家根据所有可用的方法，得到了很多参数的一些很好的估计值，这些参数是计算宇宙未来命运和完善宇宙蓝图所必需的。在图 6.16 中，箭头标志的区域是宇宙学家用不同方法得出的 Ω_{Λ} 和 Ω_{matter} 的估计值所在的范围，这与 $\Omega_{\Lambda}=0.7$ 和 $\Omega_{\text{matter}}=0.3$ 是一致的，这些数值说明宇宙是平坦的 ($\Omega_0=1$)。平常（重子）物质的密度很小，只贡献 Ω_{matter} 的很小一部分 (0.05)。所有这一切意味着：宇宙可能一直膨胀下去，但在解决人们直到现在所了解的不确定性之前，这些陈述或许不是很确定的。

如果宇宙的概貌像哈勃空间望远镜所拍摄的充满星系和引力透镜现象的美妙图像那样容易了解的话，那就好了。宇宙学家想画一些图解模型来说明宇宙的概貌，但用简单的术语来说，当他们用他们的仪器得到更多更好的资料时，他们就不得不据此对用以估计宇宙的质量、膨胀速率和所谓宇宙学距离的各种方法进行修正。每个新的研究和发现都有助于宇宙学家更好地洞察早期的宇宙。虽然我们从来就不能直接观测隐藏在不透明的早期宇宙后面的“大爆炸”的真相，但宇宙学家正在拓展我们的视野，试图提示大爆炸后的最早期的宇宙的结构（现在的宇宙正是从这一宇宙结构演化而来）。



没有人注意他脚前的是什麼，我们全都在凝视星辰。

——恩纽斯 (Quintus Ennius)

许多发现正留待于即将到来的时代……如果宇宙中不是仍有每个时代要考察的某些新奇事物，我们的宇宙就是令人遗憾的“一碟小菜”。

——塞内加 (Seneca)

我们刚刚用 6 章的篇幅图文并茂地介绍了宇宙的奇观，所介绍的内容相当丰富，包括大大小小许多宇宙天体。对于那些不怎么熟悉天文学的读者来说，他们或许认为天文学家已经发现了宇宙的一切。但任何事物都不能远离真理！正如公元前 1 世纪的哲学家塞内加在其著作所思虑的，许多发现有待于将来做出。

即使天文学家已发现宇宙中的每件事物，仅仅对宇宙中存在的大量事物进行编目就够无数代研究者忙活的了。人类还远没有完成对宇宙的探测工作。正如已故的著名科学家卡尔·萨根 (Carl Sagan) 在其宇宙系列丛书中所写的，人类在宇宙的海洋岸边或许只迈出了小小的一步，入水仅一脚深，还有辽阔、不断变化的更远水域等待我们去探索。

今天我们所梦想的未来天文台将会由我们的子孙来实现。此情况大致跟 20 世纪前几十年类似，那时的科学家和工程师仅仅模糊地知道什么仪器可能在未来会用于探测宇宙。1923 年，德国火箭科学家奥博斯 (Hermann Oberth) 写下了他对空间站和轨道望远镜的想法。在他的《火箭飞往行星空间》(Die Rakete zu den Planetenräumen) 一书中，他想象将一架望远镜搭载在地球同步轨道（与地球自转速率匹配的轨道）站上，并讨论了诸如在运行中的空间站上观测暗淡的遥远天体这样的问题。为了解决这一问题，他提出了一些相当聪明的想法：把地面望



图 7.1 像以往一样，未来的天文学家对宇宙的兴趣始于孩童时代的好奇心和激情。今天的探险家都是受到父母、太空竞赛、电视节目、参观天文馆或观察美丽星空的影响而立志献身天文事业的。明天的天文学家将热衷于超越他们的父母和祖父母。夏威夷的双子座天文台拍摄了三叶星云的清晰像，不列颠-哥伦比亚天文馆麦克米兰空间中心的星辰剧场把它投影到墙上。在三叶星云的巨幅像前面，布劳耳（Ingrid Braul，左）和德哈里瓦耳（Harveen Dhaliwal，右）摆好姿势照相。布劳耳因关于为什么她想要用双子座望远镜观测三叶星云细节的文章而获奖，因此星辰剧场选择为她投影三叶星云像；德哈里瓦耳因她的关于第九颗行星的文章而获奖，因此星辰剧场选择为她投影冥王星像

远镜架设在一颗小行星上。他甚至建议工程师设法把小行星拖到环绕地球的轨道，以使望远镜的操作人员即使生活在火星和木星的轨道之间的空间站上时也不会寂寞！

180 奥博斯的著作曾吸引了广泛的注意和一时的批评，那时到大气外旅行的任何想法最好是留给科学幻想作家。是的，对于我们现在的人来说，他的想法是完全合理的，因为在这种想法提出后的几十年，天文学家已将巨大的望远镜发射到太空中，使我们可以最大限度地观测宇宙。他们用轨道天文台和行星探测器取得了许多重要发现。即使不到空间去进行探测，地面设备也能得到很好的图像和数据，其品质迅速接近（在某些情况下相当于）空间观测系统所得到的图像和数据。

我们想知道今天关于天文台的哪些奇特想法将会成为明天广泛应用的技术。天文学家已经设想了一系列先进的太空探测器和地面探测器，其中有一些超出我们的想象，就像当年奥博斯要把望远镜放在小行星上那样超出当时的人们的想

象。由于技术发展的原因，对未来观测台进行预言一直就是一件比较困难的事情。电脑技术的发展日新月异，有些软件几乎每天都要升级或更新，天文技术的发展也是如此。自适应光学、更高效的探测器、更强大的储存能力都是先进的天文技术所带来的成果，标志着天文学研究中的变革。人们对未来天文学的激情丝毫不亚于探索更遥远宇宙的激情。因此，为圆满完成我们的宇宙之旅，我们下面展望一下今后 10 年甚至更长一段时间内将要实施的探测计划。

继续探测火星

在过去的几十年，人类已经实现了到行星实地探险的壮举，“第一大步”是 1969 年美国宇航员登上月球。当时目睹这一壮举的孩子们在随后的成长过程中，看到了他们的父母和祖父母用一系列行星探测器打开了飞往水星、金星、火星、木星和外太阳系之路。现在，轮到他们筹划派遣探测器踏上其他行星世界了，这将激励他们的孩子并为其铺路。

火星仍将受到垂青。虽然一些火星的热心家希望人类能在几年内踏上火星，但实际上或许要到 21 世纪 20 年代甚至 30 年代之后人类才可能实现这一愿望，迈出踏上行星的“第二大步”。在此之前，人类仍将继续对火星进行遥测。火星是地面望远镜和（在绕地球轨道上的）哈勃空间望远镜的重要观测对象，热心的观测者们，包括专业的和业余的，将继续测绘火星表面的亮度变化、极冠季节变化以及席卷全球的周期性尘暴。

继近年来火星探路者号探测器（Mars Pathfinder）、火星全球勘测者号轨道探测器（Mars Global Surveyor）、火星奥德赛号探测器（Mars Odyssey）成功地对火星进行实地探测之后，今后几年人们将发射一系列火星探测器，用来对火星的表面进行绘图并在火星上漫游。最近已发射的火星探测器包括“火星快车号”（Mars Express）和两艘火星探险漫游车（Mars Exploration Rovers）。其他的火星探测计划仍未确定，但有一个火星侦察轨道器（Mars Reconnaissance orbiter）已在工作，并将在 2010~2020 年实施取样返回计划。

由欧洲空间局、意大利空间局研制的火星快车号探测器于 2003 年发射，它将在环火星的椭圆形轨道上飞行，对火星表面进行拍摄，并传回火星的各类地质、气象、大气等数据，为科学家在火星上寻找“水”提供尽可能的数据支持。火星快车号探测器携带了 7 台科学仪器，包括由英国研制的着陆器“猎兔犬 2 号”。火星快车号探测器抵达火星轨道后，它携带的猎兔犬 2 号着陆器将与其分离，登陆火星。猎兔犬 2 号着陆器将采集火星土壤和岩石样本，收集火星大气温度、气压和风速等有关数据，并将收集到的信息发送回地面，以帮助科学家确定这颗红色行星

图 7.2 火星快车号探测器携带了一个测绘仪和猎兔犬 2 号着陆器（译注：这是假想图，在预定到达之前已失去联系）

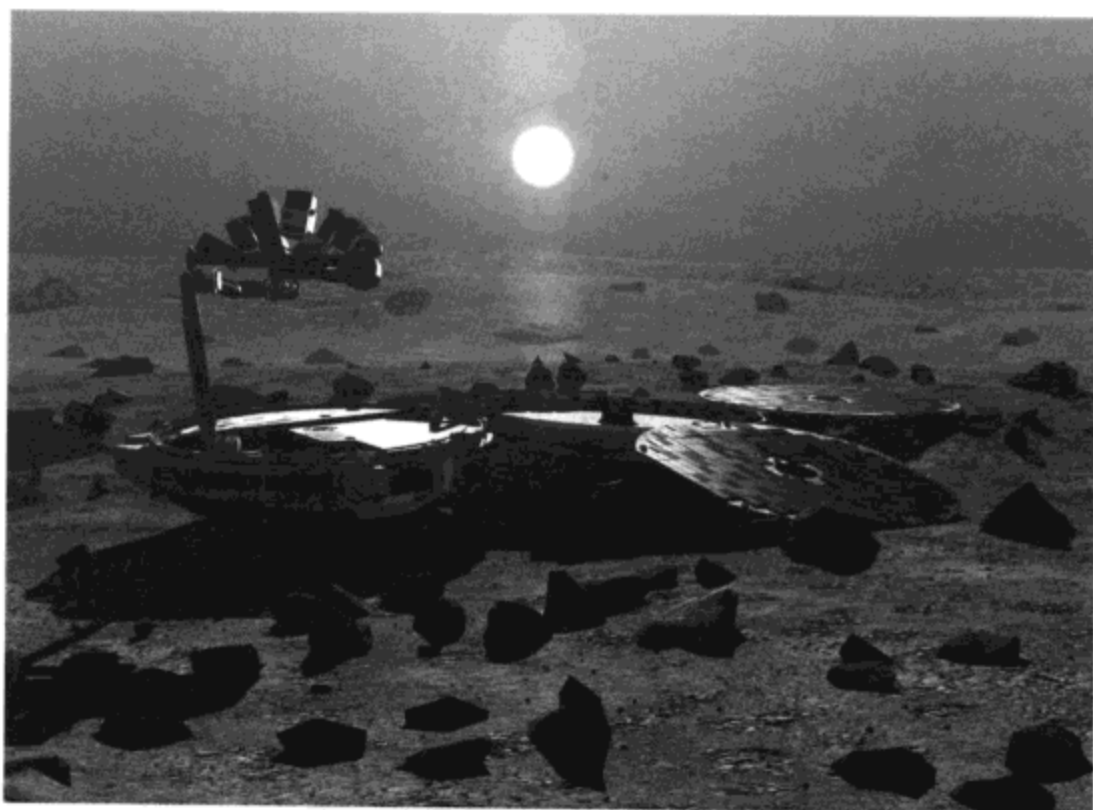
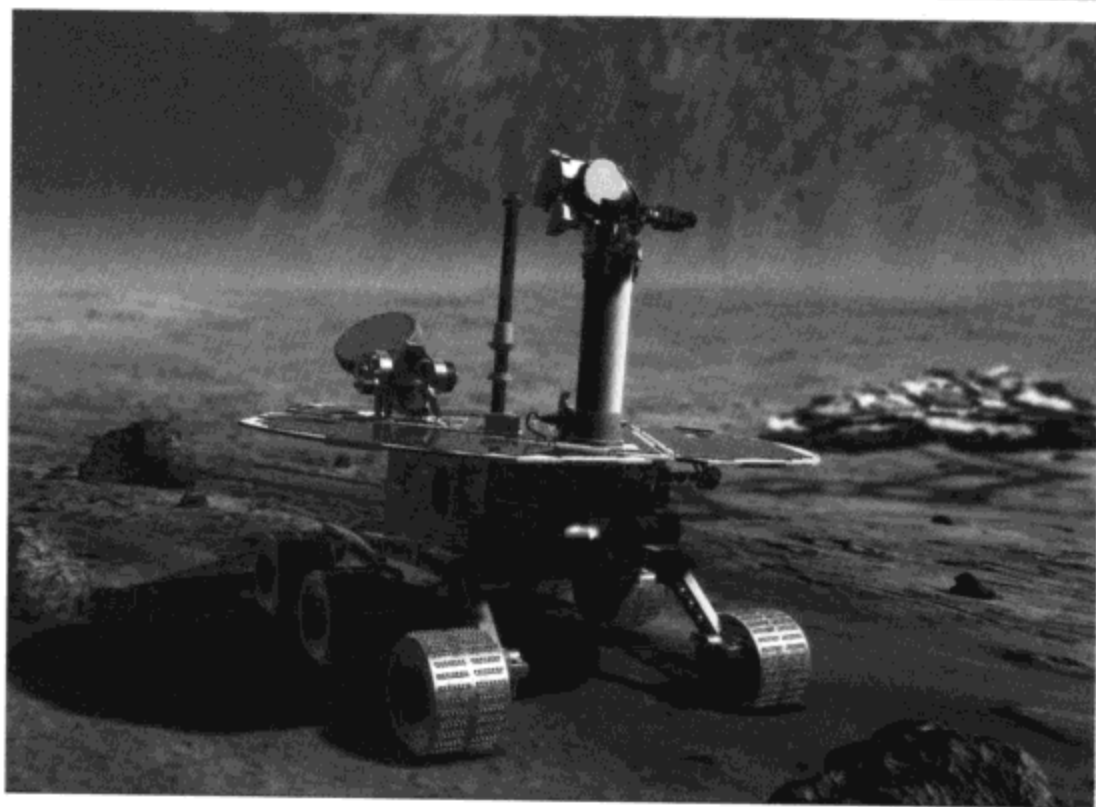


图 7.3 火星探险漫游车（一共有两艘）2004 年登陆火星（译注：这是假想图，可以在因特网上查看实际图片）

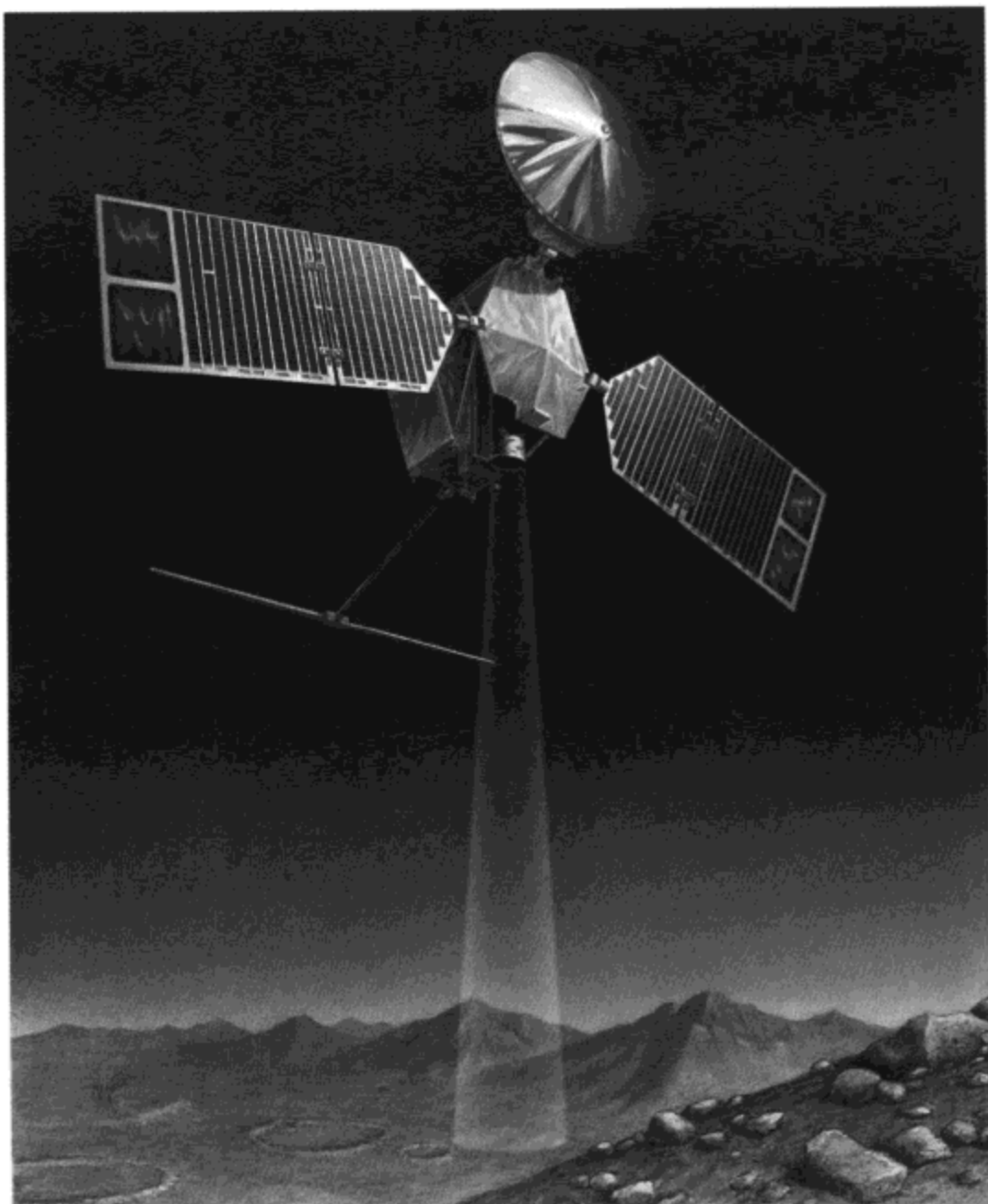


上是否存在或曾存在过生命（译注：这艘探测器已失去联系，着陆失败）。

2004 年，两艘火星探险漫游车（译注：即“勇气号”和“机遇号”）在火星的不同地点着陆，每天在火星表面漫游约 200 米，如果一切顺利，漫游车将会进行至少 90 个火星日的科学探险。它们的主要目的是在大量的岩石和土壤中寻找火星上过去有水活动的线索，首先将拍摄彩色全景图像和红外全景图像，就像火星探路者号探测器在 1997 年登陆时所做的那样。

根据火星探险漫游车发送回来的图像和光谱，科学家将指令它们探测过去已经呈现出被液态水侵袭的那些岩石和表土，并对它们的成分进行研究。随着研究任务的进行，两艘火星探险漫游车将离着陆点越来越远，在更大的范围内进行探

图 7.4 火星侦察轨道器将寻找火星上的水并扫描火星表面，以选择可能的着陆点



测，它们在一天内的行程比在 1997 年着陆火星的索杰纳号火星车（Sojourner Rover）整个寿命期（77 天）的行程还多。 182

2005 年，火星侦察轨道器将在环绕火星的轨道飞行中拍摄高分辨率的火星图像。像其他火星探测器那样，搜寻火星上的水资源是火星侦察轨道器最为重要的任务，但它还有另外一项重要任务——搜寻合适的着陆点。在火星侦察轨道器所携带的仪器中，包括一台可视立体成像摄像机（它可以拍摄火星表面的三维精确图像）、一架可见光-近红外光谱仪（用于研究火星表面的成分）、一个辐射计（测量火星的温度）和雷达（寻找火星的地下水）。 183

彗星和小行星的空间探测

由于对太阳系进行探测的第一波热潮已经扩大了我们对于行星、卫星和环系的视野，因此我们未来的探测将更侧重于仅仅曾经注意的一些天体——彗星和小行

星。它们不再只是在太阳系内游荡的杂物——一些小岩石块和冰块，而是成为了我们可以用来研究早期太阳系环境条件的天然探测器，它们可以提供有关太阳和行星形成环境的线索。它们既是我们了解古老过去的“钥匙”，又是我们探测宇宙的新前沿。

184 人们已经发射了两艘彗星探测器。星尘号彗星探测器 (Stardust, 在第 2 章已介绍过) 已经近距离飞越 5535 号小行星安尼弗兰克 (Annefrank), 并于 2004 年 1 月与威尔德 2 号 (Wild 2) 彗星实现了历史性的“亲密接触” (译注: 2003 年 12 月 31 日飞越 81P/Wild 2 的彗发)。2002 年 1 月, 日本发射了“行星-C 号” (MUSES-C) 小行星探测器 [译注: 发射时改名为隼鸟 (Hayabasa)], 它将经过 2 年多的飞行, 前往小行星 1989ML 执行 3 个月的研究任务, 包括采集一些样品, 然后于 2007 年返回地球。深度撞击 (Deep Impact) 号飞船于 2004 年 1 月发射, 前往坦普尔 1 号 (9P/Tempel 1) 彗星, 它将射出一个撞击体在该彗星上撞击出一个坑, 并对因撞击而抛出的彗星物质进行研究。

小型望远镜观测计划作为“深度撞击”计划的一个小的组成部分, 把业余天文学家、专业天文学家及个人天文台联合到一起, 在整个任务期间对坦普尔 1 号彗星进行观测, 以获得完整的、有价值的地面光学观测资料, 与“深度撞击”科学家小组所得到的资料进行配合和互补, 以测定彗核的自转和尘埃产生率。所有这些对于“深度撞击”科学家小组建立彗星的环境模型是至关重要的, 而通过建立彗星的环境模型, 科学家小组就可以准确地标明所要撞击的彗星的具体

图 7.5 深度撞击号飞船将于 2005 年 7 月射出一个撞击体, 使之与坦普尔 1 号彗星碰撞, 并将研究因撞击而抛出的彗星物质, 测绘撞击坑。科学仪器将送回组成彗核的冰、气体、尘埃的珍贵资料, 以帮助科学家揭示彗星的结构和性质

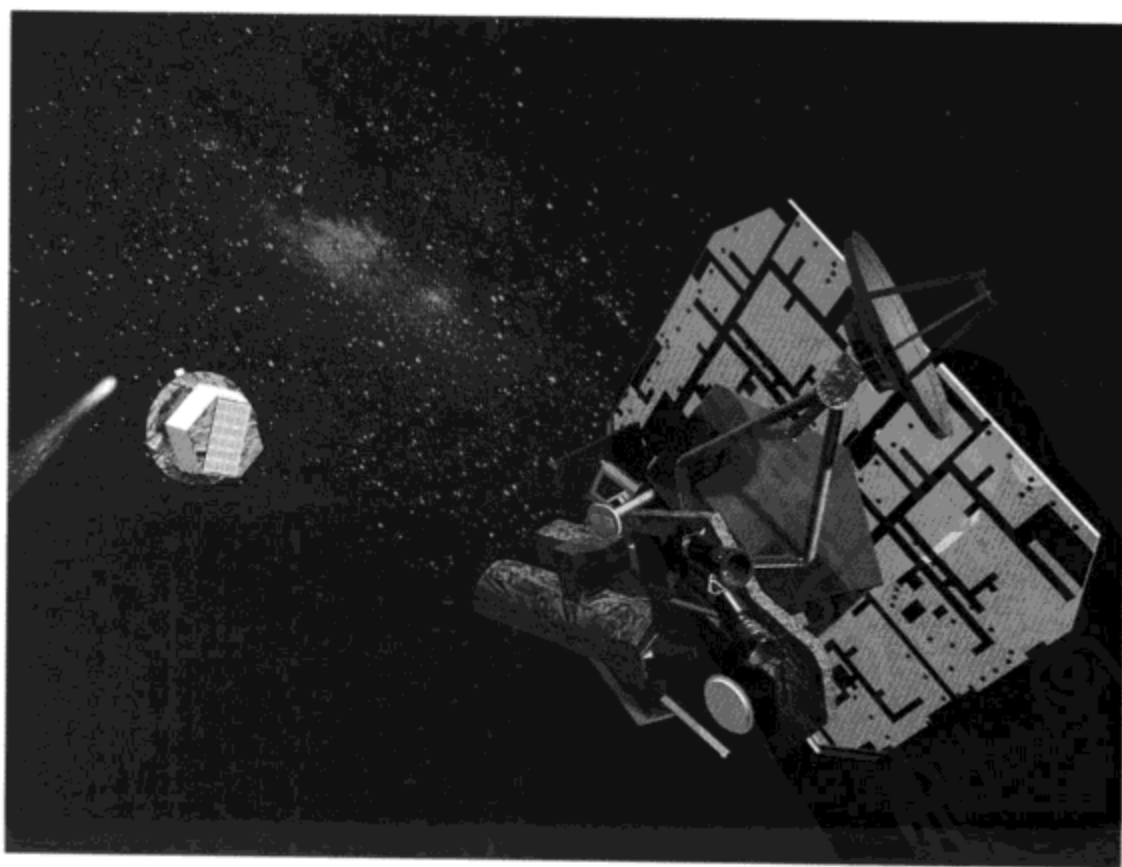


图 7.6 罗塞达号飞船将执行一个“野心勃勃”的计划：飞到一颗彗星近旁并释放一个着陆器到该彗星的表面

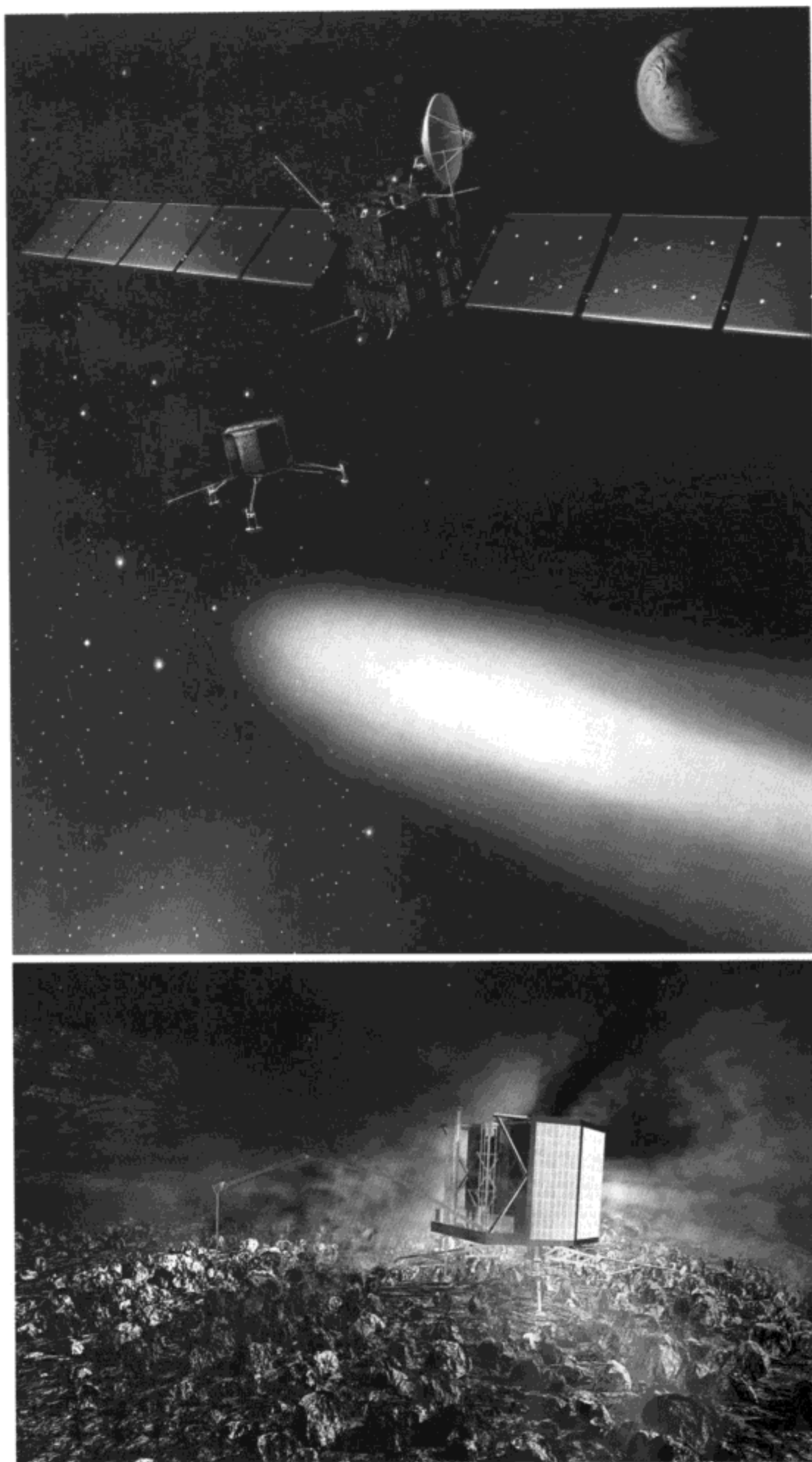
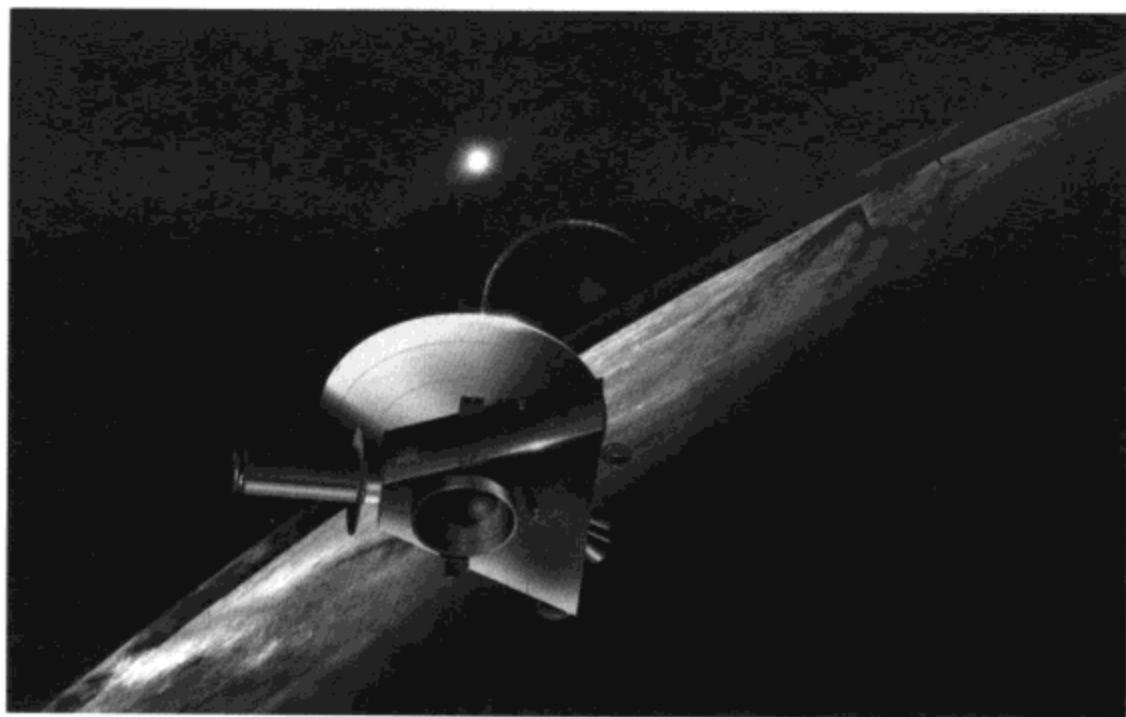


图 7.7 新地平线号探测器 (New Horizons Probe) 将有机会测绘冥王星的表面, 并研究其冻结前的稀疏大气



位置和形状以及飞船拍摄到的彗星位置和形状。

或许最令人兴奋的彗星和小行星探测器是欧洲空间局的罗塞达号飞船, 它以著名的罗塞达石碑而命名。由于故障, 罗塞达号飞船的发射几经推迟, 最后终于在 2004 年 3 月 2 日发射成功, 并将于 2014 年 8 月进入绕丘留莫瓦-格拉西梅科彗星 (67P/Churyumov-Gerasimchenko) 的轨道, 观测彗核 1 年以上, 同时分离一个着陆器缓缓降落到该彗星表面, 实地探测彗核的化学成分以及绕太阳公转过程中彗星活动的变化, 并把探测信息发送到地球。除了探测丘留莫瓦-格拉西梅科彗星之外, 罗塞达号飞船还将飞越并探测两颗小行星: Steins 和 Lutetia, 并将于 2015 年 12 月返回地球。

探测冥王星和柯伊伯带

正如地球上的每个大陆都有其未被征服的边界, 太阳系也有人类未曾探测的区域。太阳系大行星所在区域之外的巨大神秘深空有柯伊伯带和最遥远的巨大冰天体仓库——奥尔特云。正如我们在第 3 章中讨论的, 很多彗核储存在奥尔特云中, 正等待机会 (比如由于恒星从近旁经过的引力摄动而改变轨道) 进入温暖的内太阳系。而柯伊伯带含有很多较大的有趣冰天体。

发射探测器对柯伊伯带和冥王星进行探测的计划已筹备多年, 但直到近年才突然被提上紧急日程, 原因何在? 现在冥王星刚过近日点不久, 在它漫长的“夏季”, 冥王星被太阳照射而较温热, 表面的冰蒸发而足以维持稀疏的大气, 而冥王星的缥缈气体层含有冥王星和冥卫一的冰成分的宝贵线索。过了夏季, 冥王星的稀疏大气将会冻结、沉落到冥王星的表面, 如果错过了这一最佳时机, 科学家

要对冥王星的大气进行研究，就必须等到冥王星的下一个夏季（下一次过近日点前后）冥王星的气体盖层再次升高为大气时，这至少在 120 年以后。在未来十几年内，冥王星和冥卫一将离太阳越来越远，人们发射冥王星探测器也将失去有利的行星布局——利用木星的引力场使探测器加速飞往冥王星。

美国宇航局、(美国)西南研究所、约翰霍普金斯大学和来自全球的科学家一起，正在计划将一艘名为“新地平线号”[或译为“新视野号”(New Horizons)]的漫游探测器送往柯伊伯带，以研究冥王星及其姐妹天体。新地平线号探测器将携带微型摄像机、射电科学和空间等离子体的实验仪器、紫外和红外摄谱仪，目的是测绘冥王星和冥卫一的表面图，考察冥王星的大气。完成探测冥王星的任务之后，新地平线号探测器将探测附近的其他柯伊伯带天体。虽然新地平线号探测器并不是人类已发射的行程最远的探测器(事实上，这一荣誉现在属于先驱者 10 号探测器和旅行者号探测器)，但新地平线号探测器所拍摄的高分辨率图像将使我们第一次精确地观测太阳系最边远的天体。

哪里存在另外的地球

除了行星，下一个十年的天文学任务将是着重“挖掘”宇宙中最深暗处的更多信息。既然我们知道如何和在哪里找寻恒星诞生，因此合乎逻辑的下一步是，例



图 7.8 2006 年前后，开普勒号探测器将发射升空，去搜寻外太阳系的行星体，并将在 4 年的时间内观测附近的恒星以寻找类似地球的星球世界

如,搜寻跟恒星一起形成的行星。现今已发现的“热的木星”(在环绕其他恒星的轨道上运行的气体巨行星)数目有 200 多个。然而,因为种种原因,这些行星不像是生命可以繁衍的地方。天文学家想发现更像地球这样可能存在生命的世界。

188 开普勒号探测器将于 2006 年发射,它将在环绕太阳的轨道上追随地球运行,扫描和观测太阳的近邻恒星,寻找这些恒星可居带内或其附近的与地球大小相仿和更大的行星。可居带是指离一颗恒星的适当距离范围——那里的行星表面可以存在液态水。当太空探测器的敏感仪器发现这些行星时,将按它们的大小、质量、密度、绕其恒星周的轨道运动周期分类编表。探测器将会怎样发现这些行星?众所周知,恒星近旁的行星是难以看到的,实际上,几乎不可能观测到小于木星的行星。然而,当一个小天体(例如,地球大小的行星)从一颗恒星前面经过(称为“凌”恒星)时,就会挡住一些恒星的光。对于使用很灵敏的仪器的远距离观测者来说,该恒星在“凌”时显得暗了一会儿。一经检测出该恒星的光变不是由其自身原因产生的,而是因为行星“凌”它所致,那么,从光变曲线的研究就可以计算出行星的轨道和大小。开普勒号探测器上的主要仪器是口径 0.95 米的灵敏光度计,它观测 105 平方度的星场,一次可以检测 10 万颗主序恒星。

新的太空观测台

继 2002 年的国际 γ 射线天体物理学观测台 (International Gamma Ray Astrophysics Laboratory) 进入轨道之后,下一个主要的 γ 射线天文台(飞船)是

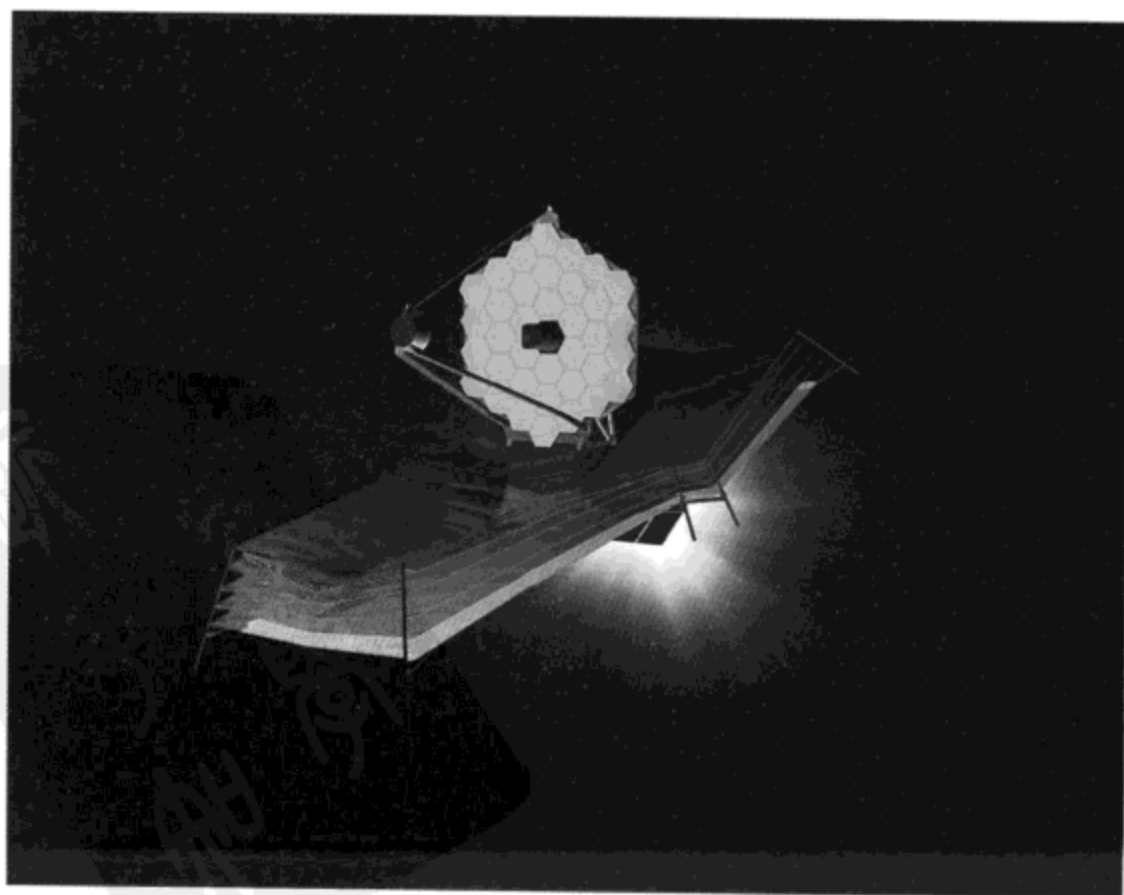


图 7.9 在 2010 年后的某个时间,韦伯空间望远镜将进入拉格朗日点的轨道,取代哈勃空间望远镜

γ 射线大面积空间望远镜 (Gamma-Ray Large Area Space Telescope, 简称 GLAST), 它将在 2006 年升空。高能天体物理学家将会拥有新工具观测宇宙中最高温辐射的天体。 γ 射线大面积空间望远镜的目的是确定剧烈活动星系核和超新星遗骸的“引擎”(或辐射机制)。除了特定的天体, γ 射线大面积空间望远镜也将测绘 γ 射线天图,重点是银河系的恒星际辐射、 γ 射线暴和暂现 γ 射线源。并且,跟 21 世纪计划发射的很多其他探测器和天文台一起, γ 射线大面积空间望远镜将进行的观测可能有助于解决暗物质和宇宙最早期发生活动的双重秘密。

加入搜寻宇宙中最暗、最远和最老的天体的有韦伯空间望远镜 (James Webb Space Telescope) 189, 它是运行多年的哈勃空间望远镜的继任者。如果一切顺利,韦伯空间望远镜将取代哈勃空间望远镜。韦伯空间望远镜有口径 6 米的活动光学组合物镜和最佳的红外仪器,观测遥远的星系(它们的辐射位移到红外波段)。韦伯空间望远镜号称探测宇宙“第一光束”的仪器,因为它将让天文学家第一次看到年龄和尺度都很小(与现在相比)时期的宇宙。

科学家想用这个著名的天文台洞察宇宙的最遥远区域,它也有很高的灵敏度来观测银河系中最老、最暗的恒星及最冷的恒星形成摇篮区,甚至有能力和环绕其他恒星的行星进行光度学探测。跟哈勃空间望远镜有所不同,韦伯空间望远镜不是放在较低的绕地球轨道上,而是放在 150 万千米远的所谓拉格朗日点的轨道位置上。

地球上的大胆探索

地面天文学家正在大胆地进行一些宏伟的探测计划,其中之一是 OWL 计划,

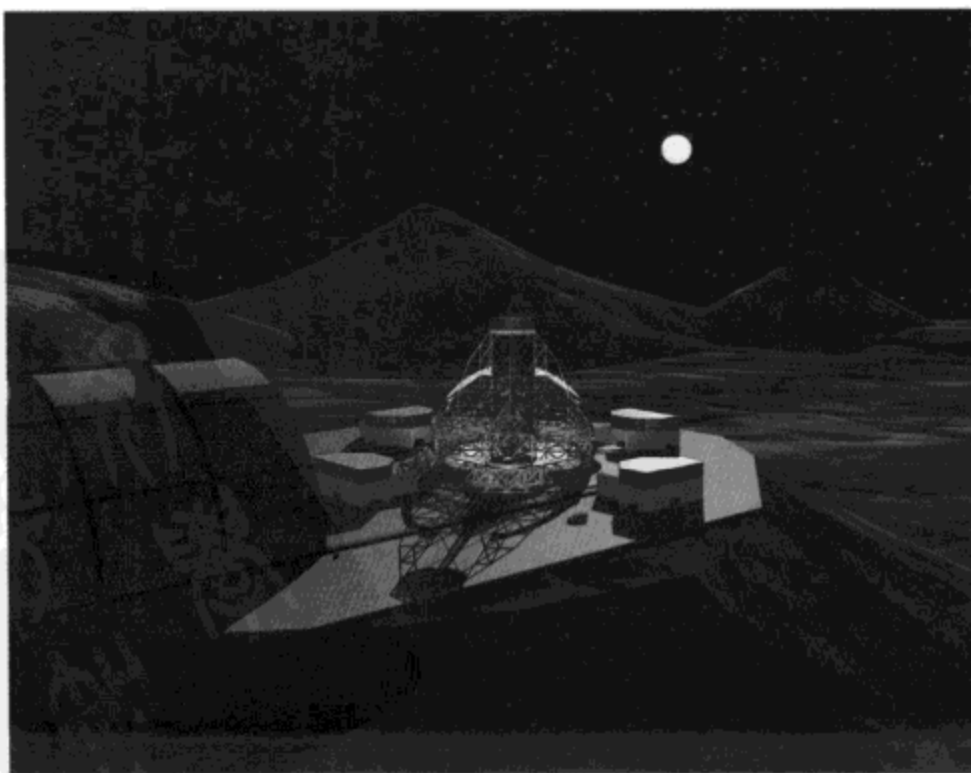


图 7.10 在未来 20 多年的某个时间,特大望远镜 (OWL) 将用 100 米的“大眼睛”观测星空

即 Overwhelmingly Large telescope——特大望远镜。这个庞然大物还在设计阶段,如果一切顺利,最早到 2012 年它会张开它的 100 米光学和红外巨眼监视星空。目前,欧洲南方天文台正在做一项初步研究。如果像计划的那样建造它,天文学家将能够从事恒星和行星系形成的长期研究。探索其他恒星的行星系将继续现今的搜寻脚步和开普勒号探测器所做的工作。除了我们的银河系,特大望远镜将能够扩展对宇宙最深远区域的洞察,找到最早的恒星和星系的诞生过程。

在建造特大望远镜之前,下一代的大面积射电望远镜阵会良好地进入运行。阿塔卡玛大型毫米波天线阵列 (Atacama Large Millimeter Array, ALMA) 建造在
190 智利安第斯山脉海拔 5000 米高处,现今已经架设一些初型的样机天线,全部建成后至少拥有 64 个直径 12 米的天线。它的观测目标将包括宇宙中气体、尘埃和固体的热辐射。目前,这些辐射只可能从太空进行低分辨率的观测。

另一个独特的地面射电观测设备——低频阵列 (LOFAR) 正计划在 2006 年开始科学观测。26000 个天线的阵列正在设计,它们将以 10 兆赫到 250 兆赫的射电频率扫描星空,设法更进一步了解发射此频率范围的射电源 (包括宇宙射电暴、合并的星系、射电星系、类星体)。在理论上,射电阵列可以用来探索早期宇宙和测绘宇宙微波背景的涨落图。在太阳系中,木星、日冕物质抛射甚至地球电离层可能是对低频阵列射电接收机的公平考验。

天文学最热门的研究领域之一就是搜寻暗物质。正如我们在第 6 章讨论的,这种人们尚未见过但具有效应的“东西”的性质仍是颇为未知的。显然它是暗的,或者至少是如此之暗,以至于没有现行工具可以直接看到它。但是我们可以根据它的引力效应而推断它的存在。如果我们只用一架望远镜去搜寻暗物质,那
191 会怎样?“大型综合巡天望远镜” (LSST) 就是这样一架地面望远镜,它的使命

图 7.11 在智利的阿塔卡玛 (Atacama) 大型毫米波天线阵列已在建造。至少有 64 个射电望远镜将架设在阿塔卡玛沙漠中

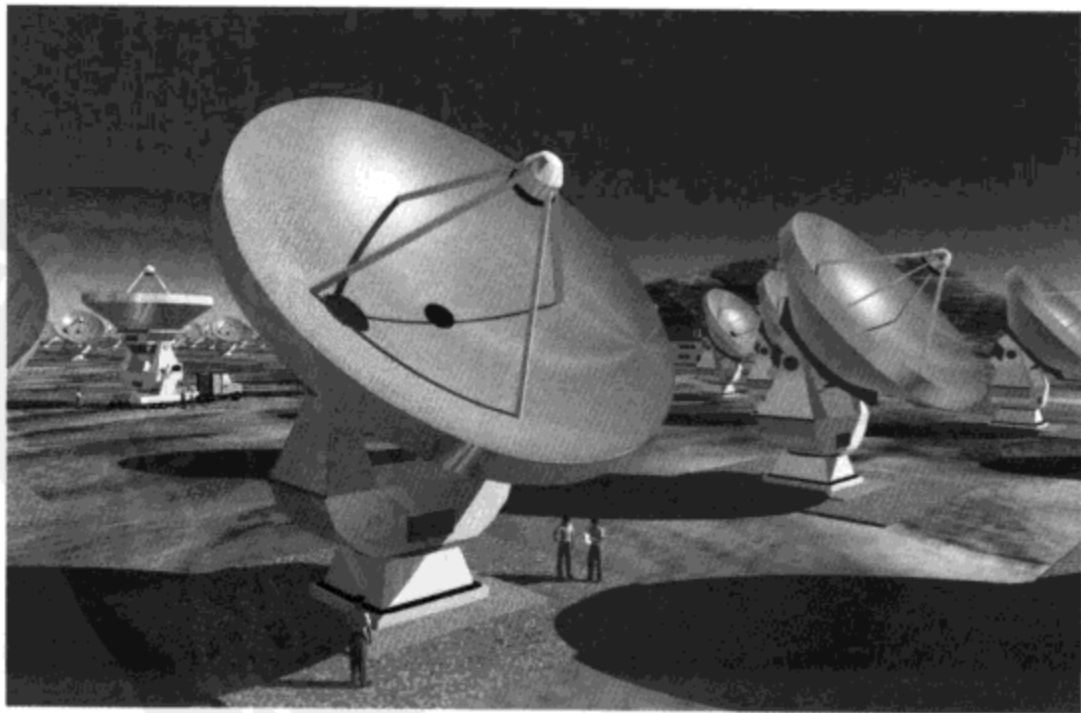
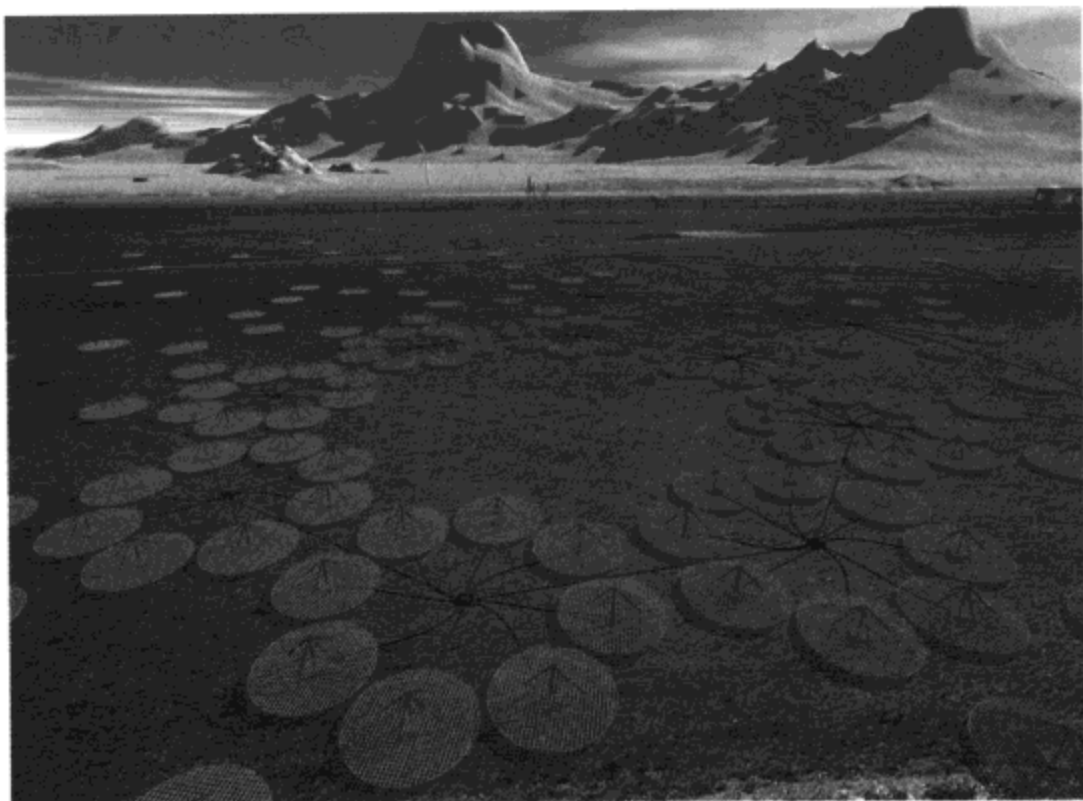


图 7.12 低频射电天线阵列中的一组接收站，它可能在 2006 年开始初步运行。如果一切按计划进行，这个广延的射电天文阵列将服务于很多学生的需要以及专业团体的计划



已从搜寻不发光物质扩展到包括搜寻近地小行星。它的口径达 8.4 米，有 3 个反射镜，将观测星空 260 平方度的特大视场。与高速计算机连接，“大型综合巡天望远镜”得到的数据可以提供近的和远的很暗天体的高品质像。它将是直接观测宇宙中暗物质的最大巡天望远镜之一。

天文研究的另一途径：寻觅文献库的珍贵资料

现今的天文研究者继承了以前难以计数的观测资料。正如我们在本书前言中所述，信息暴雨从天空倾泻而下，涌入天文研究者的磁带驱动器、光盘和其他储存装置。由于在地面和太空观测系统所用的望远镜和探测器技术的飞速进展，天文学家已经看到资料在量和质两方面的难以计数的增加。如果你参与自动巡天计划，你就可以体会到来自星空的信息量是多么的惊人！而且，它们还在继续传过来。这些信息中，有相当一部分已经转化为计算机格式，可以随时使用，像旅行者号探测器和一些地面观测所得到的较老的数据可以在因特网上下载。

世界大多数的设备有某种分享数据功能，而它们中的相当一部分也纳入公共外延网站，使得一般公众可以得到特别有趣的结果。在“成果立即公众存取”组织的领导者中，有空间望远镜科学研究所（Space Telescope Science Institute）、喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory）、国家光学天文台（National Optical Astronomy Observatories）、钱德拉 X 射线天文台（Chandra X-ray Observatory）、欧洲南方天文台（European Southern Observatory）、欧洲空间局（European Space Agency）和美国宇航局（NASA）。任何网络冲浪者都可以很轻松地在短短几分钟

192

内用搜寻引擎找到有关天体的足够信息。

庞大的图书馆备有供给天文学家使用的大量原始数据，也有公众非常感兴趣的信息。这些储存的观测数据已为终端使用者带来了储存和提取数据方面的一些问题。对于依据从前的观测数据来计划自己的研究和帮助分析新接收数据的天文学家来说，对数据进行评价很有挑战性。近年来，科学家已筹办国际虚拟天文台档案 (International Virtual Observatory Archive)，主要由美国国家虚拟天文台和 ASTROGRID (英国一个协同合作研究) 实施，其真实想法就是要创建所谓“前端” Web 网站，把来自各太空飞船、地面天文台和巡天探测计划的所有已编文献资料整合起来，让世界各地的研究者都能够进入这个网站，使用普遍可得的搜寻工具来查寻数据库中自己所需的信息，然后把数据用于自己的研究中。除此之外，计划者预见虚拟天文台可以作为业余爱好者、研究生、有志趣的公众获取天文资料的一个通道，他们能将这些资料用于自己的研究、教学或业余活动中。

在视野之外

在本书一开始，我们就告诉过你，宇宙在我们面前炫示着一些令人难以置信的美丽事物，耦合着一些似乎不能达到的距离。然后，我们向你们展示了这些事

图 7.13 三叶星云 (M20)



物。好的消息是，无论我们的探测技术变得如何先进，总是存在需要探索和做出发现的新领域。最重要是，我们都要坚持告知后代进行继续探索和学习。

最后一章开头的两个少女是未来的天文学家。也许你们知道，某些人喜欢这些未来的天文学家。也许你们就是喜欢他们的一些人。如果是这样，这是对你们的挑战。请仔细看这里给出的三叶星云图像。我们将不告诉你关于这个恒星诞生区的详情，但你可以回头去阅读第4章关于恒星诞生的内容，或者查看双子座天文台的网站（Gemini Observatory，网址见书末“进一步阅读”）上该图像的特性。

这一挑战真的是一种训练，用观察值得探索的宇宙来增加你的智慧。想一想这幅像给了你什么启发。你联想到了什么？你有怎样的感觉？你得到的答案或许使你惊奇，但，宇宙一直在进行这样的演化。



词 典

本部分收录了天文学常用的词汇，同时也包括有助于进一步理解本书中某些研究的物理概念。斜黑体字请参见其他词目（按中文拼音排序）。

- (天体的) 表号 本书中的很多天体以它在某种天体表中的编号来表示。例如，M31 是在“梅西叶表”（Messier's Catalog）中的第 31 号天体，NGC 188 是“新总表”（the New General Catalog）中的第 188 号天体。本书中还用某些特殊天体表中的编号，诸如 Arp、CL、Henize、Markarian、Melnick、PKS、3C 等的编号
- z** 光谱线红移量的符号。参见**红移**
- 暗能量** 描述宇宙中产生斥力作用的特殊形式能量的一般术语。见**宇宙学常数**和**精华**
- 暗物质** 宇宙中没有观测到的、因而“暗”的物质。这种物质可能有简单的性质，诸如光度小的恒星或者异常的亚原子粒子。广泛的证据表明宇宙存在暗物质
- 白矮星** 没有内部热核反应能源的、约地球大小的恒星。在恒星演化晚期，内部密度很大，以致原子中的电子被挤到更密近原子核。只要质量不超过 1.4 倍太阳质量，这些电子产生的压力就支撑着白矮星；而质量更大时，则成为**中子星**或**黑洞**
- 百万秒差距 (Mpc)** 一百万秒差距或 3.1×10^{19} 千米
- 暴涨** 宇宙早期，约在**大爆炸**后 $10^{-34} \sim 10^{-30}$ 秒，经历的一个异常迅速膨胀时期。这次暴涨是为解释宇宙的性质（如星系产生）所需的。暴涨的结果是宇宙有平直的几何学，参见**平直宇宙**
- 爆震波** 爆炸产生的运动激波（冲击波）
- 本征亮度** 一个天体（例如恒星）本身的亮度，即辐射功率跟距离无关。它可以指特定颜色的光或者指全部辐射，常用**绝对星等**表示。跟它同样的概念是**光度**。见**星等**
- 超巨星** 光度非常大和密度很小的一种恒星。超巨星的半径可以大到太阳半径的 1000 倍
- 超新星** 大规模爆炸而光度突然增亮 10 亿倍的一种恒星。有些类型的超新星在爆炸时会抛掉其大部分物质而形成一个膨胀的气体云（例如蟹状星云），残存的星核则形成致密天体——**中子星**或**黑洞**（取决于质量）。Ia 型超新星（有时称为白矮星型超新星）

	原是密近双星中的一颗 白矮星 ，由于吸积另一颗子星流过来的物质，其质量不断增加，当超过 钱德拉塞卡极限 会发生热核爆炸并完全耗尽，因此 光度 非常大而成为一种标准烛光
大爆炸	我们的宇宙所有物质和辐射从一个（奇）点或原始火球开始胀大的宇宙学说
大反冲	如果宇宙停止膨胀，就会自身坍缩，最终所有物质和辐射会聚集到一点，这一事件称为“大反冲”
氘	重氢原子，在它的原子核中含有一个质子和一个中子
电磁波谱	简称 EMS。所有形式的电磁辐射即辐射能量按波长或频率的分布的全部波谱，包括从 γ 射线到射电波各个波段
电子	带单位负电荷的稳定轻粒子
多普勒效应	由于光源与观测者的相对运动而导致光谱波长的改变。想到光是一种波，就可以理解波长的改变。如果光源接近观测者，每秒钟就看到更多的波，因而频率就升高、波长就变短，也就是谱线“蓝移”。如果光源远离观测者，就发生相反的情况——谱线“红移”。我们听到的火车汽笛声具有同样效应：当火车接近我们时，声调（频率）变高（相应地，波长变短）；当火车远离我们时，声调（频率）变低（相应地，波长变长）
发射(谱)线	低压炽热气体（如气体星云）产生由个别亮的谱线（称为“发射线”）组成的光谱。“谱线”的概念意味着发射占据特定波长或很窄的小波长范围，跟 连续光谱 几乎连续地占据所有波段大不一样。由气体的成分决定出现哪些特定谱线。也参见 吸收(谱)线
反照率	一个表面的反射光与入射光的强度比。它常用 0 ~ 1 的小数表示。例如，地球的反照率为 0.39，即把入射光的 39% 反射到空间
分辨率	参见 空间分辨率 、 时间分辨率 、 光谱学
辐射压	光子流（辐射）施于物体上的微弱斥力。辐射压对尘埃颗粒的作用效应较重要，而对大物体的效应不重要
光度	天体在所有波段的辐射总输出能量（即辐射总功率）称为“光度”。光度跟距离无关，它就是 本征亮度 、 绝对星等 的另一种说法。天文书上更习惯用光度，并以太阳光度作单位来表示。参见 星等
光年	天文学上常用的一种距离（或大小）的单位。它是以速度 30 万千米/秒传播的光在一年内传播的距离，即 9.5×10^{12} 千米
光谱分辨率	参见 光谱学
光谱线	由于环绕原子核的电子只能处于某些特定的能级，某种原子吸收的或发射的光子取决于能级跃迁，因而这样的光子必定是某些特定能量或波长的，这就是光谱线的起因。每种元素有其特征的光谱线（简称谱线），而谱线的强度可用于测定这种元素的丰度。从天体谱线的波长位移（ 多普勒效应 ）可以得出天体接近或远离观测者的运动（视向）速度。大量原子的运动（其速度取决于温度）导致谱线变宽，因为原子运动既有朝向观测者的，也有背向观测者的，因此，可以从谱线宽度得到温度。从几条谱线的强度或宽度可以得出密度。最后，足够强的磁场和电场也造成谱线分裂或变宽。参见 吸收(谱)线 、 发射(谱)线 、 光谱学

光谱学	进行光的分析研究，以测定发光物质或影响它的物质的性质。大致地，光谱学可以得出这些物质的成分、丰度、速度（由多普勒效应）、温度、密度以及磁场和电场。现代天体物理学的兴起显然与光谱学的发展并驾齐驱。为了进行光谱学研究，我们需要使光分解或色散为光谱，这是用棱镜、光栅（现代光谱仪中常用）来进行的。进行光谱学研究时，需要足够高的“光谱分辨率”，以便分清光谱上的各种特征。光谱分辨率常用波长 λ 除以可以分开最靠近的波长差 $\Delta\lambda$ 之商（ $\lambda/\Delta\lambda$ ）来表示
光行时	光以速度 30 万千米/秒传播。光传播一定距离所用的时间称为“光行时”
光子	电磁辐射的粒子。光子又具有波的性质，每个光子携带的能量跟它的频率成正比
广义相对论	爱因斯坦把牛顿力学普遍化而建立的引力理论，它广泛用于宇宙学的研究
哈勃常数	哈勃发现，星系的退行（远离）速度与其距离大致成正比关系，称为“哈勃定律”，其比例常数称为哈勃常数（ H_0 ）。 H_0 的现今估计值在 50 千米/（秒·百万秒差距）~100 千米/（秒·百万秒差距）的范围内，最佳值约 70 千米/（秒·百万秒差距）
核合成	化学元素由原子核反应产生。轻元素（氢及其同位素氘、氦、锂）的形成发生在“大爆炸”后不久，其他元素是在恒星内部和超新星爆炸期间产生的，在那里的高温和高压条件下，原子核有足够能量发生碰撞而结合成更重的原子核
赫-罗图	以恒星的表面有效温度（或用颜色或光谱型替代）与光度（或用本征亮度或绝对星等替代）为坐标的图，用于展示大量恒星的一般性质，因首先由赫茨普龙（Hertzsprung）和罗素（Russell）绘制这种图而得名
黑洞	广义相对论预言的一种特别致密的暗天体。大质量恒星在其演化末期发生坍缩，其物质特别致密，它有一个称为“视界”的封闭边界，由于引力场特别强，以至于包括光子在内的任何物质只能进去而逃不出来，故名为“黑洞”。黑洞的质量下限约 3 倍太阳质量，当然，这是最后的星核质量，而不是恒星在主序时期的质量（那时的质量要大很多）。除了这种“恒星级黑洞”，也可能有其他来源的黑洞——所谓“微型黑洞”可能形成于宇宙早期，而所谓“超大质量黑洞”（质量达百万到十亿倍太阳质量）可能存在于星系的中央
黑体	一种理想的物体，它可以吸收所有照射它的辐射，而黑体发出的辐射仅取决于它的温度
恒星际物质	在银河系或其他星系中处于恒星之间的气体和尘埃物质
红移	因天体有远离我们的运动，因此观测到其光谱的谱线（波长 λ ）向实验室光源同一谱线（或天体相对于我们静止时辐射的波长 λ_0 ）的长波（红）端位移了。天文学家常用红移量 $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ 来测定星系的距离。星系谱线的红移是多普勒效应所致，解释为宇宙膨胀而星系都在做相互远离的运动，称为宇宙学红移。如果星系发出波长 $\lambda_0 = 200$ 纳米的光，而测量的谱线波长 $\lambda = 800$ 纳米，则红移量 $z = 3$
弧秒	天文学常用的微小角度单位，粗略地说，1 弧秒是 1 弧度（ $=57.2957^\circ$ ）的 20 万分之一
回溯时间	因为光以不变的速度（30 万千米/秒）向空间传播，从遥远天体来的光需要经历一些时间，因此我们“看见的”是遥远天体在过去一定时刻的情况。这个时刻就是“回溯时间”。见光行时

彗星	具有脏冰彗核的一种太阳系小天体，大多在沿扁长轨道绕太阳公转的过程中出现明显的形态变化。在彗星接近太阳期间，彗核表面冰被太阳光照热而升华并带出尘埃，形成气体和尘埃组成的彗星大气，称为彗发。由于气体受 太阳风 斥力、尘埃受 太阳辐射压 斥力而流出，所以形成了很长的彗尾
活动星系	具有中央亮区且常有增强的 X 射线、紫外和射电发射的星系。活动星系包括 赛弗特星系 和 类星体 。活动可能起因于大质量的 中央黑洞
基尔霍夫定律	基尔霍夫根据光的吸收和发射实验得出的规律。参见 吸收（谱）线 、 连续光谱 、 发射（谱）线
激波	又称冲击波。由于爆炸、物体超声运动等原因，造成气体性质（密度、压力、温度）的突变层—— 激波面 以超音速传播
减速参数	宇宙膨胀因其物质的引力而减慢速率的量度
角（度）	天文学上常用角度表示天体在星空的特定方位或视（角）大小。角度的单位为°（度）、′（分）、″（秒）。整个圆周为 360°，直角为 90°。1° = 60′，1′ = 60″。注意角的分和秒跟时间的分（钟）和秒（钟）是不同的
精华	即 quintessence， 暗能量 的一种形式，它随空间和时间而变化。Quintessence 的原意是精华或古希腊哲学的（除了空气、火、水、土之外的）“第五要素”
巨星	本征亮度约为太阳本征亮度的 100 倍、半径也约为太阳半径的 100 倍的恒星
聚变	几个较轻的原子核结合为较重的原子核
绝对零度	表述绝对温度的假设概念（0K）。原子和分子在绝对零度时会停止运动
绝对温度标	在物理学中，跟气体中原子和分子运动有关的温度。这种温度标采用开尔文温标（K），它有跟摄氏温标同样大小的度，但水的冰点是 273K，水的沸点是 373K，太阳表面（ 有效温度 ）是 5750K。本书中的温度全部是 K
空间分辨率	望远镜和照相机清晰识别靠近的天体的性能的量度，概略地说，就是在像上可以看清的最小细节的能力。试跟 时间分辨率 比较
拉格朗日点	两个大质量天体绕共同的引力中心转动，它们的轨道面上有 5 个特征点，每个拉格朗日点处的小天体（其质量可以忽略不计）处于平衡状态。在地球轨道面上有 2 个拉格朗日点处的卫星保持在稳定轨道上，其余 3 个拉格朗日点是不稳定的，但飞船可以利用经过这里而减小轨道助推力
莱曼 α	氢原子光谱的主要 吸收（谱）线 或 发射（谱）线 之一，波长 121.6 纳米，简写为 $L\alpha$
类星体	类星体是一种貌似恒星、辐射很强、光谱线红移很大的天体。现在认为类星体可能是活动星系核的一种表现
离子	失去一个或多个 电子 、因而带电荷的原子或分子
连续光谱	高压下的炽热气体（例如太阳亚表面层）发射连续光谱（没有谱线），也就是在电磁波谱的很宽范围所有波长的发射辐射是连续的
量子力学	研究微观粒子运动规律的物理学理论。微观粒子具有粒子性，同时还具有波动性，即“波-粒二象性”。量子力学规律跟研究宏观现象的 牛顿力学 不同。原子中的电子只能处于某些特定的能级，因此，原子只能吸收或发射特定波长的光（即量子化的）。参见 吸收（谱）线 、 连续光谱 、 发射（谱）线

裂变	较重的原子核分裂为较轻的原子核
临界密度	以物质为主的宇宙在很长时间停止膨胀所需的宇宙密度, 称为临界密度 ρ_0 。对于哈勃常数为 70 千米/(秒·百万秒差距), $\rho_0 = 0.9 \times 10^{-29}$ 克/厘米 ³ 。这是非常小的数值。假如它们全部是氢原子, 相应的数密度是 0.5×10^{-5} 原子/厘米 ³ 。更方便的量是密度参数 Ω_0 ——实际密度与临界密度的比值。对于实际密度等于临界密度, $\Omega_0 = 1$; 对于 $\Omega_0 > 1$, 宇宙膨胀会停止而转变为收缩, 最终导致大反冲; 对于 $\Omega_0 < 1$, 宇宙会永远膨胀下去
	对于以能量为主的宇宙, Ω_0 变为 Ω_{matter} (全部物质) 与 Ω_{Λ} (暗能量) 之和。因此, Ω_0 决定宇宙的几何学。对于 $\Omega_0 < 1$, 宇宙是开的; 对于 $\Omega_0 = 1$, 宇宙是平的; 对于 $\Omega_0 > 1$, 宇宙是闭的。现在的证据显示我们处于平直宇宙
麦哲伦云	两个不规则星系: 大麦哲伦云 (LMC) 和小麦哲伦云 (SMC) 在南半球很容易用肉眼看到。它们因航海家麦哲伦 (Ferdinand Magellan) 而命名
脉冲星	发出有规律的射电脉冲信号和可见光脉冲信号的快速自转中子星
秒差距	天文学上使用的一种表示距离或大小的单位, 1 秒差距 = 3.1×10^{13} 千米。对于这样距离上的一颗恒星, 视差为 1 弧秒
纳米	十亿分之一米或 10^{-9} 米, 简写为 nm。天文学常用纳米作波长的单位。例如, 蓝光的波长约为 470 纳米
牛顿力学	计算诸如行星和恒星等天体的位置所用的理论 (或方程)。这种理论的基础是牛顿运动定律和牛顿引力定律
平直宇宙	表现为欧几里得几何学的宇宙。这意味着平行线延伸很远仍保持同样的间距, 一个三角形的内角总和等于 180° 。这种几何学适用于我们的宇宙。见临界密度
千秒差距	1000 秒差距或 3.1×10^{16} 千米, 简写为 kpc
钱德拉塞卡极限	白矮星质量的上限, 约 1.4 倍太阳质量
球状星团	银河系中的年老恒星密集成球状的集团。在银河系和其他星系都观测到球状星团
10 的幂指数记数法	为了方便地记录很大或很小的数值, 采用数学的一种简便表示方法。例如, $1000 = 10 \times 10 \times 10 = 10^3$; $2000 = 2 \times 10^3$; 百分之一或 0.01 是 $1 \div (10 \times 10) = 10^{-2}$ 。基本上, 10 的幂指数按十进制定。这种记数法也方便进行乘法和除法。做乘法时, 指数相加; 做除法时, 指数相减。例如, $100 \times 1000 = 10^{2+3} = 10^5$, $100 \div 1000 = 10^{2-4} = 10^{-2}$
时间分辨率	观测仪器系统鉴别频发事件的性能量度, 概略地说, 就是可以测定的不同事件之间的最短时间间隔。试跟空间分辨率比较
实地	In situ, 拉丁文的术语, 意思是“在当地”, 科学家在谈论探测行星或其表面时常用这个术语
视差	从不同位置观测时, 较近天体投影在遥远天体背景上的位置显现的视位移 (更确切地说是角位移)。伸出手臂食指, 先后单独用左眼和右眼观察指尖相对于远处背景的位置变化, 就可以体会视差效应。在天文学中, 从距离 1 天文单位的两个位置上观测一颗恒星 (相对于遥远天体背景的) 视位移称为“视差”。测定出一颗较近恒星的视差, 就可以利用三角公式算出距离, 因此可以用视差表示距离。见秒差距

视界	一个黑洞的表面或有效边界。没有物质或光可以从视界内逃出来。视界的半径近似于黑洞质量（太阳质量的倍数）乘以 3 千米
疏散星团	银河系中由一群年轻恒星组成的不规则集团。其他星系中的疏散星团是旋臂的明显标志
双星	在轨道上相互绕转的两颗恒星。如果在望远镜中可以分辨两星的间距，则称为“目视双星”。两颗星太接近，不能用肉眼分辨出，但能通过多普勒效应在光谱线上看出是由两组吸收线组成，从而确定是由两颗星组成的，则称为“分光双星”。大多数恒星都是双星或聚星系统的成员
太阳风	从太阳出来的低密度气体流，主要由质子和电子组成，并耦合着磁场。太阳风到地球轨道附近时的速度约为 500 千米/秒
太阳星云	整个太阳系（包括太阳）形成前身的气体—尘埃云，也称为太阳系原始星云
碳循环（核反应）	以碳原子核作催化剂的氢聚变为氦（4 个氢原子核即质子合成一个氦原子核，并释放出能量）的核反应链。碳循环反应链比质子-质子反应链发生所需的温度高些
天体测量学	测定和计算天体（主要是恒星）准确视位置和运动的学科
天文单位(AU)	地球与太阳的平均距离，大约 1.5 亿千米
同步加速辐射	加速的带电粒子在磁场中回旋所发出的辐射
同位素	同一种化学元素的原子，但原子核中的中子数目不同。例如，氢和氘是氢元素的同位素
吸收(谱)线	当经过较冷的低压气体（诸如恒星际气体）观测一种连续光谱时，出现呈吸收(谱)线的暗线。特定的谱线取决于吸收光而产生谱线的气体成分
消卷积	通常用计算机程序处理可以使模糊的像（或光谱）变得明锐。如果模糊程度可以准确地定出（例如测定一颗几乎应当是点源的恒星的模糊相貌），就可以（用计算处理）基本上消去模糊
小行星	绕太阳做公转轨道运动的一种较小的岩石天体。小行星主要位于火星与木星的轨道之间的区域（称为“小行星带”）。已知的最大小行星是“谷神星”，它的直径为 950 千米，可观测到的最小的行星的直径仅几百米
信-噪比	天文学的光测量总是由两个部分组成：一是纯粹由天体的光产生的信号；二是来自其他源（如望远镜、探测器等）产生的噪音。信号-噪音比表示测量的精度
星等	恒星的亮度的表示常沿袭似乎很混乱的历史系统——星等。星等系统有点像评判比赛优劣的等级：最好（最亮）的为 1 等，差（暗）些的为 2 等、3 等……历史上，星空最明亮的几颗星为 1 等，肉眼可见的最暗星为 6 等。现在确定出 1 等星的（视）亮度是 6 等星（星等相差 5 等）亮度的 100 倍，也就是星等大 1 等相当于亮度暗 2.512 倍，星等相差 N 等相当于亮度暗 2.512^N 倍；恒星越暗，其星等数值越大。星空各恒星的观测亮度（以星等表示）称为“视星等”。恒星都移到（实际是归算到）标准距离 10 秒差距远的星等称为“绝对星等”，由于都归算到同样的标准距离而消去了距离因素，绝对星等就是恒星本征亮度的指标。实际上，常使用某些专门的（如蓝色）滤光片来观测恒星的亮度，因而测得相应的星等系统，国际上常用的是 U（紫）、B（蓝）、V（黄）星等系统，其中 V 星等大致跟肉眼观测的“目视星等”一样

星风	这是从恒星离去的普遍常态气体流，因而造成恒星的物质损失。星风强弱的差别很大，既有温和的 太阳风 ，也有物质损失程度比太阳风强数亿倍的剧烈星风
星群视差	利用移动星群成员星运动的观测数据来测定星群距离的方法。成员星在星空的视运动（“自行”）趋向于汇聚点，而由它们光谱的 多普勒效应 可以得到它们的视向速度。毕星团的距离就是用这种方法测定的
星团	由 10 颗以上因相互较强引力作用而聚集的恒星组成的系统。见 球状星团 和 疏散星团
星系	大量恒星（数目可达万亿，即 10^{12} 颗）并常有大量尘埃及气体组成的很大天体系统。我们太阳所在的星系称为 银河系 。星系常按它们的形态分为旋涡星系、棒旋星系、椭圆星系和不规则星系
星系团	由 10 个到几千个相互之间有物理联系的星系组成的系统
星云	星系中的气体和尘埃云，例如猎户座星云。在 20 世纪早期之前，星云泛指星空中任何弥漫雾状的天体，后来的观测研究表明有些星云是银河系内的气体和尘埃云，有些实际上是“河外星云”——遥远的 星系
星族	表述不同类型恒星的一种概念，常按恒星的年龄、重元素丰度划分为两大星族。星族 I 的恒星是年轻的、重元素丰度大。星族 II 的恒星是年老的、重元素丰度小。也有细分为五个星族的
星座	为了便于识别星空，按视位置较近的一些恒星的位形特征把星空划分而成的区域。国际通用的是全天 88 个星座，人们把亮星的位形特征想象成动物或神话人物等而给星座命名，例如冬季星空的猎户（星）座——Orionis 或略写为 Ori。每个星座最亮的一些恒星依次用希腊字母表示，例如 α Ori、 β Ori 等
行星	在太阳系中环绕太阳的轨道上公转的 9 颗大的天体。按离太阳平均距离由近到远排序，它们分别是：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。近年又间接探测到环绕其他恒星的行星
行星状星云	在早期的望远镜观测中，看到呈现类似于行星斑形貌的星云。现在人们已经知道，行星状星云是热（恒）星演化晚期抛出的膨胀气体云
旋臂	旋涡星系（如 银河系 ）中气体、尘埃、年轻恒星密集的区域
银河系	我们所在的星系，由约 1000 亿颗恒星及气体和尘埃组成。银河系的大多数恒星位于盘形区域——银盘；当我们看到星空的银河时，我们是从侧向看银盘
引力	宇宙中任何天体之间都有相互吸引的力作用。两个天体相互作用的引力跟它们质量的乘积成正比、跟它们的距离平方成反比。例如，如果地球与太阳的距离增大为 2 天文单位时，地球受到的太阳引力就是现在的 $1/4$
引力透镜	广义相对论的一种效应，来自遥远天体的光线经过大质量（中间）天体近旁时，因受其引力作用而发生弯曲，就像光线经过透镜那样弯曲，故称为“引力透镜效应”。于是，我们常观测到的遥远天体的像也移位或变形了，根据遥远天体、尤其是中间天体引力场的性质而呈现多重像、亮弧像等
有效温度	如果一个天体的单位面积发射的能量与温度为 T 的理想物体（称为 黑体 ）一样，则称 T 为天体的有效温度。这个术语常用于恒星。例如，太阳表面的有效温度为 5750K

宇宙丰度	根据太阳、陨石、恒星、星云和地球的各种测量数据编制的宇宙中各元素的相对丰度标准表，一般取硅（元素）原子数目为 10^6 而列出其他元素的原子相对数目
宇宙微波背景辐射	来自宇宙年龄在 30 万 ~ 40 万年时的 原始火球 的几乎各向同性的遗留辐射，它现在的 黑体 温度为 2.73K
宇宙学	把宇宙作为整体来进行大尺度研究的学科，研究内容包括宇宙的起源、结构和演化
宇宙学常数	1917 年爱因斯坦在广义相对论方程中引入的常数，起斥力作用。该斥力保持不随时间变化。科学家近年从观测效应推断宇宙中存在起斥力作用的 暗能量 ，实际上这是宇宙学常数的另一种表述
原恒星	从恒星际的气体和尘埃云形成的、处于早期阶段的恒星
原始火球	宇宙在“ 大爆炸 ”后存在的、由基本粒子和辐射组成的极其致密和高温的状态。 宇宙微波背景辐射 是这一时期的遗物
原行星	从气体和尘埃云团形成的、处于早期阶段的行星
原子量	近似于原子中所含质子和中子的总数目。例如，氦原子有 2 个质子和 2 个中子，它的原子量是 4.003
原子序数	由一种原子的原子核所含质子的数目决定，也是正常中性（没有电离的）原子的核外电子数目
造父(型)变星	以仙王座 δ （中文名“造父一”）为典型的一种脉动变星，它们常用来作为距离指标或“量天尺”。它们的亮度变化（光变）有规则的周期，且光变周期与它们 本征亮度 （光度）存在很强的相关关系——简称“周期 - 光度关系”。因此，从观测的光变周期可以得出光度，而由观测的亮度与光度的关系可以求出距离
真空能量	所谓真空空间的最小（但有限）能量。它可能是 宇宙学常数 的物理依据
质子	原子核中的重的、带正电的基本粒子
质子 - 质子反应链	由 4 个氢原子核（即质子）合成一个氦核并放出能量的一种核反应过程。这种核反应链发生的温度比 碳循环 反应链的低些，提供太阳的主要能源
中微子	在（原子）核反应中产生的不带电荷、无质量（或质量极微小）的稳定粒子。中微子跟所有其他粒子的相互作用都很微弱
中子	重的、电中性基本粒子。中子是原子核的一种主要组成粒子
中子星	主要由 中子 组成的致密恒星，直径约 30 千米。中子星内的压力非常高，以至于绕原子核转动的 电子 也被压近原子核内并跟质子结合为中子。中子星的质量为 1.4 ~ 3 倍太阳质量。在恒星演化晚期，若残余质量小于 1.4 倍太阳质量，就成为 白矮星 ；若为 1.4 ~ 3 倍太阳质量，就成为中子星；若大于 3 倍太阳质量，就成为 黑洞 。中子星是 超新星 爆炸产生的。 脉冲星 是快速自转的中子星
重子	基本粒子的一个大类，主要包括 质子 和 中子
周期	一个物体从初始位置（或状态）变化，然后返回那个位置（或状态）所经过的时间。周期用以表述诸如行星的自转、环绕太阳的公转轨道运动、变星的亮度变化等
主序	大多数恒星在 赫 - 罗图 上密布于从左上到右下的带内，成为一个明显的序列，称为“主序”。大多数恒星在内部开始氢燃烧的热核反应后出现在主序上。恒星在一生的演化中大部分时间位于主序上

进一步阅读

网 站

《爱好者天文学杂志》(*Amateur Astronomy Magazine*)

<http://www.amateurastronomy.com/index.html>

美国变星观测者协会(American Association of Variable Star Observers)

<http://www.aavso.org>

美国天文学会(American Astronomical Society)

<http://www.aas.org>

英澳天文台(Anglo-Australian Observatory)

<http://www.aao.gov.au>

天文联盟(The Astronomical League)

<http://www.society.org>

太平洋天文学会(Astronomical Society of the Pacific)

<http://www.astrosociety.org>

当代天文学杂志(*Astronomy Now*, 英国最主要的天文学杂志)

<http://www.astronomynow.com>

每日一幅天文图像(Astronomy Picture of the Day)

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

英国天文协会(British Astronomical Association)

<http://www.britastro.org/index.html>

加拿大银道面巡天(Canadian Galactic Plane Survey)

<http://www.ras.ualgary.ca/CGPS>

钱德拉 X 射线天文台中心(Chandra X-Ray Observatory Center)

<http://chandra.harvard.edu>

彗星观测主页(Comet Observation Home Page)

<http://encke.jpl.nasa.gov>

从太空看地球(Earth from Space)

<http://earth.jsc.nasa.gov>

欧洲南方天文台(European Southern Observatory)

<http://www.eso.org>

欧洲空间局(European Space Agency)

<http://www.esa.org>

双子座天文台(Gemini Observatory)

<http://www.gemini.edu>

马林空间科学系统(Malin Space Science Systems)

<http://www.msss.com>

国际暗天空协会(International Dark-Sky Association)

<http://www.darksky.org>

美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)

<http://www.nasa.gov>(美国宇航局的门户网站)

日本国家天文台(National Observatory of Japan, NOAJ)

<http://www.naoj.org>(Subaru 望远镜主页)

(美国)国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)

<http://www.photolib.noaa.gov/collections.html>

(美国)国家光学天文台(National Optical Astronomy Observatories, NOAO)

<http://www.noao.org>

(美国)国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)

<http://www.nrao.org>

菲尔·普莱特的“糟糕的天文学”网站(Phil Plait's Bad Astronomy, 美国大学教授菲尔·普莱特的私人网站, 讲解一般人对天文学的错误观念)

<http://www.badastronomy.com>

行星图片杂志: NASA 图像访问页(Planetary Photojournal: NASA's Image Access Page)

<http://photojournal.jpl.nasa.gov>

《天空和望远镜杂志》(*Sky and Telescope Magazine*)

<http://skyandtelescope.com>

《星空新闻》(*Sky News*, 加拿大的一种天文学杂志)

<http://www.skynewsmagazine.com>

(美国)空间望远镜科学研究所(Space Telescope Science Institute)

<http://opposite.stsci.edu> <http://hubblesite.org>

培养青年天文学家星童学习中心(StarChild Learning Center for Young Astronomers)

<http://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/StarChild.html>

超级神冈中微子地下天文台(Super-Kamiokande Neutrino Observatory, 日本神冈天文台的一个分部, 位于日本)

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>

2 微米全天空巡天(2-Micron All-Sky Survey, 2MASS)

图 书

- J. Bennett, M. Donohue, N. Schneider and M. Voit (1999). *The Cosmic Perspective*. Addison Wesley Longman (《宇宙展望》, 教科书)
- P. A. Charles and F. D. Seward (1995). *Exploring the X-Ray Universe*. Cambridge University Press (《探测 X 射线宇宙》, 教科书)
- J. Kaler (1994). *Astronomy*. Harper Collins College Publishers (《天文学》, 教科书)
- S. Kwok (2002). *Cosmic Butterflies*. Cambridge University Press (《宇宙蝴蝶》, 一般读物)
- J. M. Pasachoff (2000). *A Field Guide to the Stars and Planets*. Houghton Mifflin (《恒星和行星的野外观测指南》, 一般读物)
- J. Beatty, C. C. Petersen and A. Chaikin (1999). *The New Solar System*, 4th edn. Cambridge University Press (《新太阳系》第 4 版, 一般读物)
- T. Siegfried (2002) *Strange Matters*. Joseph Henry Press. (《奇异物质》, 一般读物)

杂 志

- Astronomy Magazine*, Kalmbach Publishers, Waukesha, Wisconsin (《天文学杂志》, 读者对象为天文爱好者)
- Sky and Telescope Magazine*, Sky Publishing Corporation, Cambridge, Massachusetts (《天空和望远镜杂志》, 读者对象为业余天文学家)
- Natural History*, American Museum of Natural History, New York (《自然历史》杂志)
- Physics Today*, American Institute of Physics (《今日物理学》杂志, 读者对象为物理学家和物理专业的学生)
- Science Magazine*, American Association for the Advancement of Science, Washington, D. C. (《科学杂志》)
- Scientific American*, Scientific American, Inc., New York (《科学美国人》)



图片来源说明

略语表

2MASS	2 微米全天空巡天 (2-Micron All-Sky Survey)
ESO	欧洲南方天文台 (European Southern Observatory)
ESA	欧洲空间局 (European Space Agency)
IPAC	加利福尼亚技术研究所红外处理和分析中心 (Infrared Processing and Analysis Center, California Institute of Technology)
JPL	喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory)
JSC	约翰逊空间中心 (Johnson Space Center)
NASA	美国国家宇航局 (National Aeronautics and Space Administration)
SETI	地外文明探索 (Search for Extraterrestrial Intelligence)
SOHO	太阳和太阳风层天文台 (Solar Heliospheric Observatory)
STScI	空间望远镜科学研究所 (Space Telescope Science Institute)
封面像	奈克·楚曼尼克和伊万·金 (Nik Szymanek and Ivan King), 感谢加那利群岛拉·帕耳玛的伊萨克·牛顿望远镜小组 (the Isaac Newton Group of Telescopes, La Palma, Canary Islands)
首页	ESO

第 1 章

- 图 1.1** NASA JPL
- 图 1.2** NASA JPL, 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems), 美国地质调查局 (United States Geological Survey)
- 图 1.3** 同图 1.2
- 图 1.4** STScI
- 图 1.5** 夏威夷大学米斯太阳天文台 (Mees Solar Observatory, University of Hawaii); 瑞典皇家科学

院 (Royal Swedish Academy of Sciences)

- 图 1.6 ESO 的非利浦·杜浩克斯 (Philippe Duhoux)
- 图 1.7 2MASS 像册 (Atlas Image)。感谢 2MASS/UMass/IPAC 加利福尼亚技术研究所 (California Institute of Technology) /NASA/国家科学基金会 (National Science Foundation)
- 图 1.8 ESO
- 图 1.9 STScI
- 图 1.10 STScI; ESO
- 图 1.11 STScI
- 图 1.12 ESO
- 图 1.13 SISCI
- 图 1.14 (美国) 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)
- 图 1.15 双子座天文台 (Gemini Observatory), STScI, ESO
- 图 1.16 STScI
- 图 1.17 取自钱德拉 x 射线天文台提供的资料
- 图 1.18 同图 1.17
- 图 1.19 SOHO, 阳光与洛克希德·马丁公司 (Yohkoh and Lockheed Martin Corporation), (美国) 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)
- 图 1.20 柳温·拉麻逊高能太阳摄谱成像仪探测器 (Rheven Ramaty High-Energy Solar Spectrographic Imager Explorer)
- 图 1.21 汤姆·道宾斯 (Tom Dobbins)

第 2 章

- 图 2.1 NASA JSC; NASA JPL; 马克·C·彼得森 (Mark C. Petersen); 卡洛林·考林斯·彼得森 (Carolyn Collins Petersen); 瑞典皇家科学院 (Royal Swedish Academy of Sciences)
- 图 2.2 双子座天文台 (Gemini Observatory); 麦克唐纳天文台 (McDonald Observatory), (奥斯汀) 得克萨斯大学 (University of Texas at Austin)
- 图 2.3 阿塞耳·梅灵格 (Axel Mellinger); 2MASS; 国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory); 极紫外探测器 [Extreme Ultraviolet Explorer (NASA)]; 伦琴卫星 (ROSAT) [Röntgensatellit (ROSAT) (ESA)]; 康普顿 γ 射线天文台 [Compton Gamma-Ray Observatory (NASA)]
- 图 2.4 ESO
- 图 2.5 版权 1977 ~ 2002 (Copyright 1977 ~ 2002), 英澳天文台的大卫·马林摄 (Anglo-Australian Observatory, photograph by David Malin)
- 图 2.6 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)

- 图 2.7 双子座天文台 (Gemini Observatory); 昴星团天文台 (日本国家天文台) [Subaru (National Observatory of Japan)]; (夏威夷) 莫纳基亚天文台的詹姆斯·克拉克·麦克斯韦望远镜 (James Clerk Maxwell Telescope, Mauna Kea Observatory, Hawaii)
- 图 2.8 同图 2.6
- 图 2.9 史密松天体物理天文台 (Smithsonian Astrophysical Observatory)
- 图 2.10 国家天文和电离层中心 (NAIC) - 阿雷西博天文台 (国家科学基金会的一个机构 [National Astronomy and Ionospheric Center (NAIC) - Arecibo Observatory, a facility of the National Science Foundation]); 国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory); 焦德雷班克天文台的伊恩·莫里林 (Ian Morrison, Jodrell Bank Observatory); 国家射电天文台的戴夫·芬利 (Dave Finley, National Radio Astronomy Observatory)]
- 图 2.11 加利福尼亚技术研究所 (California Institute of Technology); 东京大学宇宙线研究所神冈观测台 (Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo)
- 图 2.12 伽利·艾莫森 (Gary Emerson)
- 图 2.13 NASA JSC
- 图 2.14 钱德拉 X 射线天文台中心 (Chandra X-ray Observations Center)
- 图 2.15 同图 2.14
- 图 2.16 NASA
- 图 2.17 NASA JPL, 加利福尼亚技术研究所 (California Institute of Technology)
- 图 2.18 同图 2.16
- 图 2.19 NASA JPL
- 图 2.20 同图 2.17

第 3 章

- 图 3.1 NASA JPL
- 图 3.2 照片感谢 NASA JSC 地球科学和图像分析实验室 (Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA JSC)
- 图 3.3 STScI
- 图 3.4 STScI; ESO
- 图 3.5 SOHO; STScI
- 图 3.6 从太空看地球, NASA JSC
- 图 3.7 弹道导弹防卫组织防卫部 (Department of Defense, Ballistic Missile Defense Organization); NASA JPL; 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems)
- 图 3.8 NASA 近地小行星会合探测器 [Near-Earth Asteroid Rendezvous mission (NASA)]
- 图 3.9 NASA JPL
- 图 3.10 弗雷德·艾斯佩纳克 (Fred Espenak, www. MrEclipse. com), 版权 2002
- 图 3.11 感谢月球和行星实验室的阿兰·特雷曼 (Alan Treiman, Lunar and Planetary Laboratory)
- 图 3.12 a: STScI

- 图 3.12 b: 新墨西哥大学 (University of New Mexico)
- 图 3.13 密歇根大学的约翰·T·克拉克 (John T. Clarke, University of Michigan); NASA²¹¹
- 图 3.14 同图 3.2
- 图 3.15 STScI
- 图 3.16 ESO; 国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory)
- 图 3.17 弹道导弹防卫组织防卫部 (Department of Defense, Ballistic Missile Defense Organization); STScI; NASA JPL; 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems)
- 图 3.18 STScI; NASA JPL; 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems)
- 图 3.19 NASA JPL; 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems)
- 图 3.20 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems); NASA JPL
- 图 3.21 同图 3.20
- 图 3.22 NASA JPL; 马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems)
- 图 3.23 a: 地球科学和图像分析实验室 (Earth Sciences and Image Analysis Laboratory); b、d、e、f: NASA JPL/马林空间科学系统 (Malin Space Science Systems)
- 图 3.24 NASA JPL
- 图 3.25 NASA JPL
- 图 3.26 NASA JPL
- 图 3.27 STScI
- 图 3.28 NASA JPL; STScI
- 图 3.29 NASA JPL; STScI; NASA 红外望远镜 (Infrared Telescope Facility)
- 图 3.30 NASA JPL
- 图 3.31 NASA JPL
- 图 3.32 NASA JPL
- 图 3.33 NASA JPL
- 图 3.34 STScI
- 图 3.35 STScI
- 图 3.36 NASA JPL
- 图 3.37 NASA JPL
- 图 3.38 双子座天文台 (Gemini Observatory)
- 图 3.39 NASA; STScI
- 图 3.40 NASA JPL
- 图 3.41 (编注: 原书无)
- 图 3.42 钱德拉 X 射线天文台中心 (Chandra X-ray Observation Center)
- 图 3.43 克尔尼·沃尔天文台的赫尔曼·米库兹 (Herman Mikuz, Crni Vrh Observatory)

第 4 章

- 图 4.1 日本国家天文台 (National Observatory of Japan)

- 图 4.2 ESO
- 图 4.3 2MASS
- 图 4.4 STScI
- 图 4.5 STScI
- 图 4.6 STScI
- 图 4.7 STScI
- 图 4.8 2MASS
- 图 4.9 国家海洋和大气局的约翰·博特尼尔克 (John Bortniak, National Oceanic and Atmospheric Administration)
- 图 4.10 SOHO
- 图 4.11 T·W·库兹尼艾尔/卡洛林·考林斯·彼得森 (T. W. Kuzniar/Carolyn Coliins Petersen)
- 图 4.12 J·戴维·柯克帕特里克 (J. Davy Kirkpatrick), IPAC
- 图 4.13 ESO
- 图 4.14 英澳天文台 (Anglo-Australian Observatory) 的大卫·马林 (David Malin) 摄, 版权 1979 ~ 2002
- 图 4.15 2MASS
- 图 4.16 ESO
- 图 4.17 STScI
- 图 4.18 STScI
- 图 4.19 STScI
- 图 4.20 STScI
- 图 4.21 STScI
- 图 4.22 STScI
- 图 4.23 ESO
- 图 4.24 STScI
- 图 4.25 STScI
- 图 4.26 STScI
- 图 4.27 STScI
- 图 4.28 STScI
- 图 4.29 科罗拉多大学 (University of Colorado) 的塞斯·列德菲尔德 (Seth Redfield)
- 图 4.30 STScI; ESO
- 图 4.31 STScI
- 图 4.32 钱德拉 X 射线天文台中心 (Chandra X-ray Observatory Center); STScI
- 图 4.33 STScI
- 图 4.34 STScI
- 图 4.35 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)
- 图 4.36 ESO
- 图 4.37 钱德拉 X 射线天文台中心 (Chandra X-ray Observatory Center); STScI

- 图 4.38 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation); STScI
- 图 4.39 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)
- 图 4.40 2MASS
- 图 4.41 STScI
- 图 4.42 NASA
- 图 4.43 STScI

第 5 章

- 图 5.1 双子座天文台 (Gemini Observatory) 的罗杰·施密斯 (Roger Smith)
- 图 5.2 阿塞耳·梅灵格 (Axel Mellinger)
- 图 5.3 2MASS
- 图 5.4 STScI
- 图 5.5 日本国家天文台 (National Observatory of Japan)
- 图 5.6 STScI
- 图 5.7 STScI
- 图 5.8 STScI
- 图 5.9 STScI
- 图 5.10 ESO
- 图 5.11 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)
- 图 5.12 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation)
- 图 5.13 ESO
- 图 5.14 日本国家天文台 (National Observatory of Japan)
- 图 5.15 STScI
- 图 5.16 红外天文卫星 (Infrared Astronomy Satellite); (马尼托巴大学) 贾炎恩·恩格里什 (Jayanne English, University of Manitoba) 利用加拿大银道面巡天国家研究委员会/自然科学和工程研究委员会 [the Canadian Galactic Plane Survey National Research Council/Natural Sciences and Engineering Research Council (Canada), NRC/NSERC] 所获得的资料并得到了 (凯加利大学的) 露斯·泰勒 (Russ Taylor, University of Calgary) 的支持
- 图 5.17 ESO
- 图 5.18 STScI; 加利福尼亚技术研究所 (California Institute of Technology) IPAC 的汤姆·贾里特 (Tom Jarrett)
- 图 5.19 ESO; STScI
- 图 5.20 ESO; STScI

- 图 5.21 STScI
- 图 5.22 STScI
- 图 5.23 钱德拉 X 射线天文台中心 (Chandra X-ray Observatory Center); 国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory)
- 图 5.24 STScI
- 图 5.25 STScI
- 图 5.26 STScI
- 图 5.27 STScI
- 图 5.28 STScI
- 图 5.29 STScI
- 图 5.30 国家光学天文台/大学天文研究协会/国家自然科学基金会 (National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation); STScI; 钱德拉 X 射线天文台中心 (Chandra X-ray Observatory Center)
- 图 5.31 STScI
- 图 5.32 STScI

第 6 章

- 图 6.1 约翰·C·布兰特 (John C. Brandt)
- 图 6.2 温笛·弗里曼 (Wendy Freedman); G·丁德曼 (G. Dindermann)
- 图 6.3 STScI
- 图 6.4 宇宙背景探测器 (COBE) NASA [Cosmic Background Explorer (COBE) NASA]
- 图 6.5 2MASS
- 图 6.6 澳大利亚国立大学的马修·柯利斯 (Matthew Colless, Australian National University), 2 度视场星系红移巡天 (2DF Galaxy Redshift Survey)
- 图 6.7 卡洛林·考林斯·彼得森 (Carolyn Collins Petersen) 取自 J·奥斯特里克 (J. Ostriker)
- 图 6.8 哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope), A·菲利品寇 (A. Filippenko), W·李 (W. Li)
- 图 6.9 STScI
- 图 6.10 亚当·瑞斯 (Adam Riess) 等人 (NASA)
- 图 6.11 马克斯·特格马尔克 (Max Tegmark)
- 图 6.12 感谢 NASA 威尔金森微波各向异性探测器 [Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (NASA)]
- 图 6.13 STScI
- 图 6.14 STScI
- 图 6.15 A·泰森 (A. Tyson), 贝尔实验室 (Bell Labs), 朗讯技术公司 (Lucent Technologies)
- 图 6.16 A·泰森 (A. Tyson), 贝尔实验室 (Bell Labs), 朗讯技术公司 (Lucent Technologies)
- 图 6.17 根据加利福尼亚技术研究所 (California Institute of Technology) 的 E·希温和 M·卡米恩考夫斯基 (E. Hivon and M. Kamionkowski) 提供的资料

第7章

- 图 7.1 双子座天文台 (Gemini Observatory)
- 图 7.2 EAS
- 图 7.3 NASA JPL
- 图 7.4 NASA JPL
- 图 7.5 NASA JPL
- 图 7.6 ESA
- 图 7.7 NASA/约翰斯·霍普金斯大学/西南研究所 (NASA/Johns Hopkins University/Southwest Research Institute)
- 图 7.8 NASA/SETI 研究所 (NASA/SETI Institute)
- 图 7.9 STScI
- 图 7.10 ESO
- 图 7.11 ESO
- 图 7.12 低频阵列 (LOFAR) 合作组织 [Low-Frequency Array (LOFAR) Consortium]; M·C·彼得森 (M. C. Petersen)
- 图 7.13 双子座天文台 (Gemini Observatory)



索引

说明：各条目后面的数字说明了条目在本书中的位置（页码或边码）。如果条目出现在图注中，则该数字代表本书的页码；如果条目出现在正文中，则该数字代表原书的页码，即本书的边码。

- 2-Degree Field Galactic Redshift Survey (2DF) 2度（角视场）星系红移巡天 167, 168
- 2-Micron All-Sky Survey (2MASS) 2微米全天空巡天 6, 28, 117
- 47 Tucanae 杜鹃座47星 97
- Abell 1689 阿贝尔星系团表第1689号 175
- Abell 2218 阿贝尔星系团表第2218号 175
- absorption line 吸收线 22
- ACS (Advanced Camera for Surveys) 巡天高级照相机, 见 *Hubble Space Telescope*
- Anglo-Australian Observatory 英澳天文台 31
- Andromeda Galaxy 仙女星云 (M31 = NGC 224) 137, 161
- albedo 反照率 80
- angles, angular measurement 角, 角度测量 172
- Ant Nebula (Menzel 5, Mz 3) 蚂蚁星云 (门泽耳第5号, Mz 3) 121
- Antarctic Submillimeter Telescope Observatory 南极亚毫米波望远镜天文台 34
- Arecibo Observatory 阿雷西博天文台 35
- Ares Valles 战神谷 69
- Armstrong, Neil 内尔·阿姆斯特朗 50
- Asimov, Isaac 艾萨克·阿西莫夫 131
- asteroid belt 小行星带 55, 195
- asteroids 小行星 195
- astrometry 天体测量学 114
- astronomical unit (AU) 天文单位 (AU) 8
- Atacama Large Millimeter Array (ALMA) 阿塔卡玛大型毫米波（天线）阵列 (ALMA) 190

AU 见 *astronomical unit*

AURA 见 *Associated Universities for Research in Astronomy*

B33/IC 434 马头星云 (巴纳德表第 33 号天体/星云星团新总表第 434 号天体) 11

Barnard 68 巴纳德 (表第) 68 (号天体) 102

baryons 重子 165

Beagle-2 猎兔犬 2 号 181, 182

Betelgeuse 参宿四 (猎户座 α) 20, 99

Big Bang (宇宙) 大爆炸 vi, 24, 118, 150, 164

Big Crunch (宇宙) 大反冲 164

Black holes 黑洞 18, 99~100, 133, 134, 168 见 *quasars*

BOOMERanG (Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics) 河外星系微波辐射和地球物理的气球观测 39

Braul, Ingrid 因格里德·布劳耳 180

brown dwarf 褐矮星 8, 68, 112, 113

Burns, Robert 罗伯特·伯恩斯 50

Callisto 木卫四 46, 59

Canada-France-Hawaii Telescope 加拿大-法国-夏威夷望远镜 32

Cartwheel Galaxy 车轮星系 149

cassegrain telescope 卡塞格林望远镜 40

Cassini Division (土星) 卡西尼环缝 75

Cassini-Huygens mission 卡西尼号飞船 29, 48, 73, 75

Cat's-Eye Nebula 猫眼星云 119, 120

cataclysmic variables 激变变星 125

Centaurus A 半人马 (座) A 154

cepheid variables 造父变星 160—161

Cerro Tololo Inter-American Observatory 智利托洛洛山的泛美天文台 124

Chandra X-Ray Observatory 钱德拉 X 射线天文台

Charon 见 *Pluto*

Circinus Galaxy 圆规座星系 134

Chandrasekhar, Subramanyan 苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡 41

cluster parallax 星团视差 196

clusters 见 *galaxies* 和 *stars*

COBE 见 *Cosmic Background Explorer*

Comet Borrelly 波瑞利彗星 88

Comet Hale-Bopp 海尔波普彗星 89

Comet Hyakutake 白武彗星 89—90

Comet Shoemaker-levy 9 苏梅克-利维 9 号彗星 52—54

comets 彗星 87—90

Compton Gamma Ray Observatory 康普顿 γ 射线天文台 xiii, 28, 128

Cone Nebula 锥状星云 (NGC 2264) 110, 112
 continuous spectrum 连续谱 20
 Cosmic Background Explorer (COBE) 宇宙背景探测器 (COBE) 159
 Cosmic Background Imager 宇宙背景摄像机 36
 cosmic microwave background (CMB) radiation 宇宙微波背景 (CMB) 辐射 36, 164—165, 173
 cosmos 宇宙 1, 158
 cosmological constant 宇宙学常数 170
 cosmological distance ladder 宇宙 (学) 的距离 梯子 160—162
 cosmology 宇宙学 158
 Crab Nebula, pulsar 蟹状星云, 脉冲星 121—123
 critical density 临界密度 163
 Cygnus Loop 天鹅环 121—122
 dark energy 暗能量 159, 170—171
 dark matter 暗物质 159, 167—168, 188
 data mining 寻觅资料 191—193
 deceleration parameter 减速参数 见 *Universe, deceleration parameter*
 Deep Impact mission 深度撞击号 (彗星) 飞船 184
 Deuterium 氘 115, 165
 deuterium-to-hydrogen ratio 氘/氢比 168
 D/H ratio 见 *deuterium-to-hydrogen ratio*
 Dhaliwal, Harveen 德哈里瓦耳 180
 Die Rakete zu den Planetenräumen (*The Rocket Into Planetary Space*) 《火箭飞往行星空间》 179
 Dione 土卫四 80, 83
 distance scales 距离标尺 160—162
 Doppler effect 多普勒效应 113
 Doppler spectroscopy 多普勒光谱学 113
 Doppler shift 多普勒位移 113, 161
 dwarf stars 矮星 见 *stars*
 Eagle Nebula 鹰状星云 见 *M16*
 Earth 地球 2, 51, 66
 Edwin P. Hubble Space Telescope 哈勃空间望远镜 见 *Hubble Space Telescope*
 Eight-Burst Nebula 八暴星云 见 *Southern Ring Nebula*
 Einstein, Albert 爱因斯坦 170
 Eistla Regio 艾斯特拉区 70
 electromagnetic spectrum (EMS) 电磁波谱 16—18, 37
 Ellington, Mercer M·艾灵敦 158
 Emerson, Ralph Waldo R·W·爱默生 1, 91
 emission line 发射线 22, 157
 emission nebula 发射星云 11

EMS 电磁波谱 见 *electromagnetic spectrum*
 Encke Division 恩克环缝 77
 Enceladus 土卫二 59
 Ennius, Quintus Q·恩纽斯 179
 ESA 欧洲空间局 见 *European Space Agency*
 ESO 510-13 似巴拿马帽形的星系 14
 Eskimo Nebula 爱斯基摩星云 118, 119
 Eta Carinae 船底座 η 125
 Etched Hourglass Nebula 沙漏星云 118
 Europa 木卫二 46, 50, 70, 79
 European Southern Observatory 欧洲南方天文台 8, 10, 30, 65, 103, 192
 European Space Agency (ESA) 欧洲空间局 41, 181, 107
 Evans Solar Facility 埃文思太阳观测设备(日冕仪) 34
 event horizon 视界 152
 expanding universe 膨胀的宇宙 162—165, 168—174
 Extreme Ultraviolet Explorer 极紫外探测器 28
 Fine Guidance Sensors (FGSs) on HST 哈勃空间望远镜上的精密制导传感器(FGS) 见 *Hubble Space Telescope*
 flat universe 平宇宙 172, 178
 fusion 聚变 97
 galaxies 星系
 active 活动~ 134, 142, 152—156
 barred spiral 棒旋~ 135, 141
 building blocks, ~ “建筑砖块” 151
 clusters ~ 团 142, 162, 165, 166, 175
 collisions and interactions ~ 碰撞和相互作用 142—143, 144, 145, 146, 148
 elliptical 椭圆~ 141, 162
 evolution of ~ 演化 142—143
 irregular 不规则~ 141
 most distant 最远的~ 150, 161
 Seyfert 赛弗特~ 152
 spiral, spiral arm 旋涡~, 旋臂 133, 138
 Galilei, Galileo 伽利略 131
 Galileo spacecraft 伽利略号飞船 29, 47, 74
 gamma-ray bursts γ 射线暴 128, 129, 130
 Gamma-Ray Large Area Space Telescope (GLAST) γ 射线大面积空间望远镜 188
 Ganymede 木卫三 46, 63, 79
 Gemini Observatories (Frederick C. Gillette) 双子座天文台 27, 33, 8, 180
 general relativity 广义相对论 174

GHRS (Goddard High Resolution Spectrograph) 见 *Hubble Space Telescope*
 Giacconi, Riccardo R·贾库尼 41
 Gliese 229 112, 113
 Gliese 876 114
 globular clusters 球状星团 见 *Stars, clusters*
 GOES weather satellite GOES 气象卫星 22
 gravitational lenses 引力透镜 174, 174—178
 Grunsfeld, John J·戈拉斯弗耳德 25
 Ho 见 *Hubble Constant*
 HH objects HH 天体 见 *Herbig-Haro objects*
 H-R Diagram 赫-罗图 见 *Hertzsprung-Russell Diagram*
 HDF 见 *Hubble Deep Field*
 Hawking, Steven 斯蒂芬·霍金 158
 Herbig-Haro objects 赫比格-阿罗 (HH) 天体 105—107
 Hertzsprung-Russell diagram 赫-罗图 100, 160
 Hickson Compact Group (HCG) 87 希克森致密群 87 (HCG 87) 145
 High Resolution Spectrograph 高分辨率摄谱仪 见 *Hubble Space Telescope*
 Hipparcos satellite 依巴谷 (天体测量) 卫星 29
 Hoag's Object 郝格天体 14, 135
 Hobby-Eberly Telescope 大型拼镶镜面望远镜 (HET) 26
 Horsehead Nebula 马头星云 见 *B33/IC434*
 HSP (High Speed Photometer) 见 *Hubble Space Telescope*
 Hubble, Edwin 艾德温·哈勃 40, 142, 160
 Hubble Constant 哈勃常数 160—162
 Hubble Deep Field 哈勃深空观测计划 25, 150
 Hubble Space Telescope 哈勃空间望远镜 26, 40, 41, 50, 160
 Advanced Camera for Surveys (ACS) 高级巡天照相机 41
 Faint Object Camera (FOC) (on HST) 暗弱天体照相机 (在 STT 上) 40
 Faint Object Spectrograph (FOS) (on HST) 暗天体摄谱仪 (在 HST 上) 40
 Fine Guidance Sensors (FGS) 精密制导传感器 (FGS) 41
 Goddard High Resolution Spectrograph (GHRS) 戈达德高分辨光摄谱仪 (GHRS) 40
 High Speed Photometer (HSP) 高速光度计 (HSP) 41
 Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer (NIMOS) 近红外照相机和多体摄谱仪 41
 Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS) 空间望远镜成像摄谱仪 (STIS) 41
 Wide Field and Planetary Cameras 宽视场/行星照相机 40—41, 95
 Hubble tuning fork diagrams (with infrared tuning fork) 见 *tuning fork diagram*
 IC 418 见 *Spirograph Nebula*
 IC 2163 (with NCC 2207) 135
 impacts 撞击 53—60

inflation (宇宙早期) 暴涨 164

infrared tuning fork diagram 见 *tuning fork diagram*

International Ultraviolet Explorer (IUE) 国际紫外探测器 160

interstellar medium 星际介质 105, 165

intrinsic brightness (luminosity) 本征亮度 (光度) 99, 160, 10, 46, 50, 63, 70—72, 70, 79

IUE 见 *International Ultraviolet Explorer*

James Clerk Maxwell Telescope 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦亚毫米波望远镜 32

James Webb Space Telescope 韦伯空间望远镜 188, 188

Jupiter 木星 50, 72—74, 73

 aurorae ~ 极光 63, 64

 Great Red Spot ~ 大红斑 73, 75

 moons 木卫 (木星的卫星) 79, 79—81

 Shoemaker-Levy 9 impact 苏梅克-利维9号彗星撞击 (木星) 53—54

Keck Observatory 凯克天文台 32

Kelvin temperature scale 开尔文 (绝对) 温度标 19

Kepler mission 开普勒号探测器 187—188, 187

kiloparsec 千秒差距 8

Kirchhoff, Gustav 古斯塔夫·基尔霍夫 20

Kirchhoff's Laws 基尔霍夫定律 20

Kitt Peak National Observatory 见 *National Optical Astronomy Observatories*

Kuiper Belt 柯伊伯带 52, 86—87, 186

Lagrangian point 拉格朗日点 188—189

Large-Scale Synoptic Survey Telescope (LSST) 大型综合巡天望远镜 (LSST) 191

La Silla Observatory 拉-西亚天文台 30

Leavitt, Henrietta 亨丽达·勒维特 160

light 光 12—18

light year 光年 4

light-travel time 光行时 8, 142

Little Ghost Nebula 小妖星云 118, 119

Low Frequency Array (LOFAR) 低频 (射电天线) 阵列 190, 191

luminosity 光度 19, 199, 160

M16 10, 107—112, 108—109

M42 7—9, 94, 100—105, 102—104

M74 14

M80 96

M82 139

M87 153

MACHOs 见 *Massive Compact Halo Objects*

MacMillan, H. R., Space Center H·R·麦克米兰空间中心 180

Magellanic Clouds 麦哲伦云 95, 132, 138, 161
 magnitudes 星等 19—20, 99, 161
 main sequence 主序 100, 160
 Mars 火星 3, 4, 57, 66—70, 181, 183
 moons 火星的卫星 79
 Mars Exploration Rovers ~ 探险漫游车 181, 182
 Mars Express ~ 快车号探测器 181, 182
 Mars flash, ~ 闪亮 23—24
 Mars Global Surveyor ~ 全球勘测者号轨道探测器 4, 44, 45
 Mars Odyssey mission ~ 奥德赛号探测器 26
 Mars Pathfinder ~ 探路者号探测器 181
 Mars Reconnaissance orbiter ~ 侦察轨道器 181, 183
 Maunder, E. W E·W·毛恩德尔 91
 megaparsec 百万秒差距, 兆秒差距 4, 8
 Menzel 5 (Mz 3) 见 *Ant Nebula*
 Messier, Charles 查尔斯·梅西叶 131
 Messier catalog 梅西叶表 131
 meteorites 陨石 60—62
 Mars 火星 ~ 60, 62
 Vesta 灶神星 (第4号小行星) ~ 60, 62
 Milky Way Galaxy 银河系 28, 11—132, 133, 166, 188
 Mimas 土卫一 80
 Moai of Tongariki 同卡瑞奇的莫艾 159
 Mount St. Helens volcano 圣海伦火山 70
 MUSES-C probe 行星-C号小行星探测器 184
 MyCn 18 沙漏星云 120
 National Astronomical Observatory of Japan 日本国家天文台 32
 National Optical Astronomy Observatories (NOAO) (美国) 国家光学天文台 51
 nebula 星云 131
 primordial solar 原始太阳 ~ 52—53
 Neptune 海王星 77—78
 moons 海卫 (海王星的卫星) 81, 82
 neutrinos 中微子 36, 122, 177
 neutron 中子 201
 neutron stars 中子星 148
 New Horizons probe 新地平线号探测器 186
 NGC 1316 141
 NGC 1365 139
 NGC 2207 (连同 IC 2163) 135

NGC 3079 140
 NGC 3310 151
 NGC 4038/4039 147—148
 NGC 4261 155
 NGC 4314 135
 NGC 4414 133
 NGC 4526 170
 NGC 5090/5091 144
 NGC 5653 135
 NGC 6751 12
 NGC 6872 14, 145
 NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) 见 *Hubble Space Telescope*
 nucleosynthesis 核合成 172
 Oberth, Hermann 奥博斯 179
 open clusters 疏散星团 见 *stars*
 Orion Nebula 猎户星云 见 *M42*
 Orion Molecular Cloud 猎户分子云 见 *M42*
 Overwhelmingly Large Telescope (OWL) 特大望远镜 189, 189
 parsec 秒差距 4, 8
 Penzias, Arno A·彭齐亚斯 164
 period-luminosity law 周期-光度关系 160
 Perseus spiral arm 英仙旋臂 140
 photometry 测光(光度测量) 19—20, 39
 Pillars of Creation 创星柱 见 *M16*
 planetary atmospheres 行星大气 72—78
 planetary nebulae 行星状星云 117—120, 162
 planetary rings and satellites 行星的环系和卫星 78—86
 planets 行星 见 *individual planets*
 planets, extrasolar 太阳系之外的行星 112—115, 187—188
 Pluto 冥王星 4, 43, 86—87, 186—187
 primordial fireball (宇宙) 原始火球 115, 164
 proplyds 原行星盘 见 *protoplanetary disks*
 protoplanetary disks 原行星盘 104
 protostars 原恒星 106
 Proxima Centauri 半人马座比邻星 6, 97
 pulsars 脉冲星 17, 122—124, 123
 Q_0 见 *universe, deceleration parameter*
 Quaoar 夸奥艾尔 87
 quarks 夸克 164, 177

quasars 类星体 156—157, 157
 quintessence 精华 见 *dark matter*
 ρ_0 见 *Universe, critical density*
 RCW 108 93
 Re, Pedro 彼得罗·雷 vii, 37
 red dwarf 红矮星 114
 redshift 红移 147, 161, 167
 Rees, Sir Martin 里斯 25
 resolution 分辨率 19—20
 Richard B. Dunn Solar Telescope 理查德·B·杜恩太阳望远镜 34
 Ring Nebula 环状星云 117
 Robert C. Byrd Green Bank Telescope 绿岸射电望远镜 35
 ROSAT (Röntgen Satellite) 伦琴卫星 28
 ROSETTA mission 罗塞达号飞船 184, 185
 Sagittarius star cloud 人马座恒星云 95
 Saturn 土星 5, 75, 76
 atmosphere ~ 大气 75—77
 aurorae ~ 极光 64, 64
 moons 土卫 (土星的卫星) 79
 rings ~ 环系 81—84, 82
 Seneca 塞内加 179
 Seyfert, Carl 赛弗特 152
 Seyfert galaxies 见 *Galaxies*
 SL 105 IRS 4 92
 Smithsonian Submillimeter Array 史密松亚毫米波射电望远镜阵 32
 Solar Heliospheric Observatory (SOHO) 太阳和太阳风层天文台 29
 Solar Maximum Mission 太阳 (活动) 极大使命 22
 Solar System formation 太阳系形成 52, 53
 solar wind 太阳风 6, 62—63, 90, 97
 Sombrero Galaxy 草帽星系 136
 Southern Ring Nebula (Eight-Burst Nebula) 南环状星云 (八暴星云) 118, 119
 Space Infrared Telescope Facility (SIRTF) 空间红外望远镜 42—43
 spatial resolution 见 *resolution*
 spectral lines 光谱线 113, 161
 spectral resolution 见 *resolution*
 spectroscopy 光谱学 19, 113
 spiral arm 见 *Galaxies*
 spiral galaxies 见 *Galaxies*
 Spirograph Nebula (IC 418) 斯皮洛格拉夫行星状星云 (IC 418) 118

standard candle 标准烛光 161
 standard model 见 *cosmology*
 Stardust mission 星尘号彗星探测器 46, 49
 stars 恒星
 birth/formation ~ 诞生/形成 7—10, 28, 100—112, 134—136
 mass loss ~ 物质流失 112
 dwarfs 矮星 99
 nuclear reactions ~ (原子) 核反应 97
 properties ~ 性质
 masses ~ 质量 99
 radii ~ 半径 99
 temperatures ~ 温度 99
 red giants 红巨星 162
 starburst activity ~ 形成暴活动 146
 supergiants 超巨星 99
 white dwarfs 白矮星 12, 169
 stellar winds 星风 见 *mass loss*
 Stephan's Quintet 斯特芬五重星系 146
 STIS 见 *Space Telescope Imaging Spectrograph*
 substellar dwarfs 亚恒星矮星 101
 Sun 太阳 5, 6, 51, 97—99
 Sunflower galaxy 向日葵星系 134
 supergiant stars 见 *Stars*
 Super-Kamiokande (neutrino detector) 超级神冈地下(中微子)探测器 36
 Supernova 1987a 124
 Supernova 1994d 170
 Supernova 1997ff 181
 supernova remnant 超新星遗迹 13
 supernovae 超新星 52, 121—124, 162
 T_0 见 *Universe, age*
 Tadpole Galaxy 见 *UGC 10214*
 Tarantula Nebula 蜘蛛星云 96
 temperature, effective 有效温度 100
 temporal resolution 见 *resolution*
 Tethys 土卫三 80
 Thackeray's Globules 撒克里球状体 10
 The Antennae 见 *NGC 4038/4039*
 Titan 土卫六 45, 80, 81
 Tombaugh, Clyde 汤博 86



Trifid Nebula 三叶星云 111, 180, 192, 193
 Triton 海卫一 70, 81, 82
 tuning fork diagram 音叉图 143
 Tvashtar Catena (volcano) (木卫一) 火山链 70
 Twain, Mark 马克·吐温 158
 UGC 10214 (The Tadpole) “蝌蚪” 星系 136
 ultraviolet dropout 紫外光“退出” 148
 Ulysses spacecraft 尤利西斯号探测器 128
 United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) 英国红外望远镜 3
 universe 宇宙
 age ~ 年龄 159 ~ 166
 closed 闭 ~ 164
 critical density ~ 临界密度 163
 current summary ~ 组成的现时概括 169—178
 deceleration parameter 减速因子 164
 density parameter 密度参数 164
 open 开 ~ 164
 Old Standard Model 旧标准模型 162—165
 University of Hawaii Telescope 夏威夷大学望远镜 32
 Uranus 天王星 77—78
 moons 天卫(天王星的卫星) 70, 71, 81, 82
 rings ~ 环系 85—86, 85
 Van Gogh, Vincent 凡·高 1
 veil Nebula 帷幕星云 121
 Venus 金星 66, 70, 72—72
 Very Large Array 甚大阵(射电望远镜) 26, 35
 Very Large Telescope (欧洲南方天文台) 甚大望远镜 10, 30, 101
 Vesta 灶神星(第4号小行星) 60—62
 Virgo Cluster 室女座星系团 166
 volcanoes, volcanism 火山, 火山活动 70—72
 Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) 弱相互作用大质量粒子(WIMPs) 168
 WF/PC 1 见 *Hubble Space Telescope*
 WF/PC 2 见 *Hubble Space Telescope*
 white dwarf 见 *stars*
 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 威尔金森微波各向异性探测器 174
 Wilson, Robert W. 威尔逊 164
 WIMPs 见 *Weakly Interacting Massive Particles*
 Yohkoh “阳光” 21, 42
 z 147 也见 *redshift*